



PROJETO DE GRADUAÇÃO

UTILIZAÇÃO DO PROCESSO DE BIODIGESTÃO ANAERÓBICA PARA CONVERSÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS ORGÂNICOS URBANOS

Por,
Kevin Araújo de Almeida

Brasília, 09 de Dezembro de 2018

UNIVERSIDADE DE BRASILIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

PROJETO DE GRADUAÇÃO

UTILIZAÇÃO DO PROCESSO DE BIODIGESTÃO ANAERÓBICA PARA CONVERSÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS ORGÂNICOS URBANOS

POR,

Kevin Araújo de Almeida

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. Armando de Azevedo Caldeira Pires, UnB/ ENM (Orientador)

Prof. Mário Benjamim Baptista Siqueira, UnB/ ENM

Prof. Mário Olavo Magno de Carvalho, UnB/ ENM

Brasília, 09 de Dezembro de 2018

RESUMO

Este trabalho consiste num estudo à respeito dos aspectos ambientais, energéticos e econômicos da utilização do processo bioquímico de biodigestão anaeróbica para conversão de energia térmica e elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU), especificamente aquele com elevada carga de matéria orgânica. Foi realizada uma revisão sistemática da literatura científica e tecnológica através de bases de dados científicas, de patentes e um software de análise bibliométrica com a finalidade de se criar uma base de conhecimento para os estudos, além da caracterização de diversos sistemas de biodigestão comercialmente disponíveis. De forma a aplicar os conhecimentos teóricos reunidos foi proposto um estudo de caso para analisar a implementação de um sistema comercial de biodigestão anaeróbica no Restaurante Universitário da Universidade de Brasília. Informações de entrevistas, publicações científicas e dispostas pelo fabricante foram combinadas de forma a se realizar um estudo sobre a produção do biogás do sistema determinado, a redução de emissões promovida e os aspectos econômicos das instalações. Por fim verificou-se que o sistema seria capaz de produzir 64.5 m³ de biogás por mês, evitando o consumo mensal de até 1.46 m³ de óleo diesel, reduzindo as emissões em 4.1 toneladas. O tempo de retorno estimado foi de aproximadamente 25 anos e aponta o investimento na solução como inviável, visto que sua vida útil é de 20 anos. Os valores pouco atrativos estão diretamente relacionados com os baixos custos com a coleta e disposição de resíduos, além da falta de incentivos financeiros para a produção de energia renovável a partir do biogás no Brasil.

ABSTRACT

This work consists in a study regarding the environmental, energy and economical aspects of the anaerobic digestion process for conversion of thermal and electrical power from municipal solid wastes (MSW), specifically those with higher organic matter content. A systematic scientific and technological literature review was carried through science and patent databases and a bibliometric analysis software in order to create a knowledge base for the studies, also the characterization of several commercially available digestion systems was made. In order to apply the reunited concepts it was proposed a case study to analyze the implementation of a commercial anaerobic digestion system in the University of Brasília restaurant. Information from interviews, scientific and manufacturer provided data were reunited to evaluate the biogas production aspects, the environmental impact reduction and the financial aspects regarding the system. Finally it was verified that the system would be capable of producing 64.5 m³ of biogas monthly, making avoidable the consumption of 1.46 m³ of diesel and reducing CO₂ emissions by 4.1 tons. The estimated return period for the investments was approximately 25 years, which indicates the investment as not viable, since the equipment has a projected lifespan of 20 years. The very unattractive results are directly related to the low costs of garbage disposal and the lack of policies for renewable energy production from biogas in Brazil.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
1.1. OBJETIVOS	9
1.2. METODOLOGIA.....	10
1.3. ESTRUTURA.....	10
2. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	12
2.1. CRITÉRIOS ESTABELECIDOS	12
2.1.1. DETERMINAÇÃO DA PERGUNTA DE PESQUISA	13
2.1.2. CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO	13
2.1.3. SELEÇÃO E ACESSO A LITERATURA	13
2.1.4. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA LITERATURA.....	14
2.1.5. ANÁLISE, SÍNTESE E DIVULGAÇÃO DOS RESULTADOS.....	14
2.1.6. SCIMAT	15
2.2. REVISÃO SISTEMÁTICA DO CONHECIMENTO CIENTÍFICO.....	18
2.2.1. ANÁLISE DESCRITIVA	18
2.2.2. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA COM O SCIMAT.....	22
2.2.3. ANÁLISE DE CONTEÚDO DOS TEXTOS SELECIONADOS	35
2.3. REVISÃO DO CONHECIMENTO TECNOLÓGICO	41
2.4. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA TECNOLÓGICO	43
3. CONCEITOS TEÓRICOS	48
3.1. PROCESSO DE BIODIGESTÃO.....	48
3.2. ASPECTOS AMBIENTAIS E ECONÔMICOS	51
4. ESTUDO DE CASO.....	53
4.1. CARACTERIZAÇÃO DO RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO.....	53
4.2. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA APLICADO	55
4.3. PRODUÇÃO DO BIOGÁS E CONVERSÃO DE ENERGIA	57
4.4. REDUÇÃO DE EMISSÕES	59
4.5. ANÁLISE ECONÔMICA	61
4.5.1. INVESTIMENTO INICIAL (<i>I</i>) E CUSTOS OPERACIONAIS (<i>CM</i>).....	61
4.5.2. ESTIMATIVA DOS RETORNOS.....	62
4.5.3. CUSTO ESPECÍFICO (<i>C/B</i>) E TEMPO DE RECUPERAÇÃO <i>T</i>	63
5. CONCLUSÃO.....	65

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
--	-----------

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Interface de gerenciamento de palavras-chave do SciMAT.	16
Figura 2. Interface de definição dos períodos de análise.	16
Figura 3. Interface de definição dos parâmetros de análise.	17
Figura 4. Interface para visualização dos resultados.	18
Figura 5. Número de publicações por ano.	19
Figura 6. Classificação das publicações quanto a área.	21
Figura 7. Períodos definidos para a análise bibliométrica.	23
Figura 8. Mapa de sobreposição.	23
Figura 9. Mapa de evolução por h-index.	24
Figura 10. Cluster anaerobic-digestion por h-index.	27
Figura 11. Cluster municipal-solid-waste por h-index.	28
Figura 12. Cluster waste-management por h-index.	29
Figura 13. Cluster biogas por h-index.	30
Figura 14. Cluster electricity-generation por h-index.	31
Figura 15. Cluster energy-efficiency por h-index.	32
Figura 16. Diagrama estratégico por h-index para os seis clusters principais.	33
Figura 17. Distribuição do número de patentes por ano.	42
Figura 18. Sistema unitário de biodigestão anaeróbica (Fonte: Homebiogas).	44
Figura 19. Sistema de biodigestão em contêiner Puxintech (Fonte: Puxintech).	45
Figura 20. Flexibuster à esquerda e Muckbuster à direita (Fonte: SeAB Energy).	45
Figura 21. Instalações do sistema em contêineres BioQUBE (Fonte: QUBErenewables).	46
Figura 22. Instalações do sistema Kwayb Waste Solution (Fonte: Ecoproducts).	47
Figura 23. Etapas bioquímicas da biodigestão anaeróbica (Fonte: Senai).	49
Figura 24. Esquema do processo de biodigestão anaeróbica (Fonte: Senai).	50
Figura 25. Restaurante Universitário da UnB (Fonte: UnB Agência).	53
Figura 26. Esquema elaborado para o serviço do Restaurante Universitário.	54

Figura 27. Funcionamento esquemático da unidade Flexibuster. Adaptado de: https://www.youtube.com/watch?v=WS1EMy2zwJI (acessado em 19/11/2018).	56
Figura 28. Esquema para representação do uso do processo de biodigestão no RU.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Palavras-chave utilizadas na primeira busca.	13
Tabela 2. Palavras-chave utilizadas na segunda busca.....	14
Tabela 3. Divisão dos artigos com relação ao foco.....	15
Tabela 4. Os dez países com maior número de publicações.	19
Tabela 5. As dez instituições com maior número de publicações.....	20
Tabela 6. As dez revistas com maior número de publicações.....	21
Tabela 7. Publicações de maior impacto e principais nodos dos clusters selecionados.....	26
Tabela 8. Os dez principais artigos em função do número de menções, segundo análise bibliométrica realizada pelo SciMAT.....	34
Tabela 9. Palavras-chave utilizadas na busca pela base de dados Patentscope.....	41
Tabela 10. Os dez países com maior número de patentes.....	42
Tabela 11. As dez instituições com o maior número de patentes.....	43
Tabela 12. Produção e composição do biogás em função dos resíduos orgânicos (Fonte: Zhang et al, 2006).....	51
Tabela 13. Informações acerca da unidade do Restaurante Universitário (Fonte: Sanoli, 2018, entrevista estruturada, Brasília, 19/11/2018).....	54
Tabela 14. Características físicas e químicas dos resíduos alimentares (Fonte: Kwon).	55
Tabela 15. Dados do sistema na Universidade de Southampton (Fonte: BioCycle).....	57
Tabela 16. Produção diária de energia a partir do metano gerado.	58
Tabela 17. Economia mensal de diesel devido à substituição pelo biometano.	59
Tabela 18. Composição molecular dos combustíveis consideradas no cálculo de emissões.	60
Tabela 19. Valores para a redução de emissões em toneladas de CO ₂ por mês.....	60
Tabela 20. Custos associados à instalação e operação do sistema de biodigestão no RU.....	62
Tabela 21. Retornos associados à utilização do sistema de biodigestão no RU.....	63
Tabela 22. Tempo de retorno para os sistemas das Universidades de Southampton e de Brasília.	64

1. INTRODUÇÃO

Embora haja divergências quanto a origem antropogênica do aumento da temperatura global registrado nas últimas décadas, é crescente o consenso na comunidade científica mundial de que, segundo certas correntes de projeções, as mudanças climáticas atribuídas aos gases de efeito estufa emitidos pela ação humana irão exceder qualquer alteração que poderia ter ocorrido naturalmente nos últimos 1000 anos. Durante as crises na oferta do petróleo no passado, várias fontes renováveis de energia passaram a ser consideradas alternativas economicamente viáveis. Porém com a relativa estabilização observada a partir da segunda metade da década de 80 os esforços e investimentos aplicados nesse campo foram reduzidos drasticamente. Atualmente com a maior visibilidade e conscientização coletiva a respeito da progressiva escassez dos combustíveis fósseis, o surgimento de políticas públicas ambientais mais contundentes e o acúmulo de resíduos provenientes do uso desses recursos, as energias alternativas retomaram os holofotes e vêm sendo desenvolvidas e implementadas de forma eficiente, tecnologicamente e economicamente viável. (Henriques et al, 2004)

Durante as últimas décadas o crescimento populacional, aumento da urbanização, rápida industrialização e mudanças no estilo de vida da sociedade levaram a constantes aumentos na produção de resíduos sólidos urbanos (RSU) ao redor do mundo. Hoje em dia a coleta, processamento e deposição de RSU são alguns dos problemas mais controversos encontrados pelos governos. De forma geral, RSU podem incluir qualquer um ou todos os cinco diferentes grupos de resíduos, biodegradáveis, tóxicos, compósitos, recicláveis e inertes. Os métodos convencionais de deposição mais praticados e com menores custos, como lixões e aterros, são comprovadamente não-sustentáveis devido à limitação da disponibilidade de terras, além do impacto social e ambiental gerados (Barati et al, 2017).

Tendo em vista a tendência mundial crescente de investimento em fontes renováveis de energia alternativas aos combustíveis fósseis, e considerando o problema criado pela geração do lixo, a utilização de rejeitos como recurso energético e sua transformação em matéria prima para a produção de energia elétrica surgem como uma alternativa para lidar com dois desafios do mundo contemporâneo: o manejo dos resíduos e a demanda energética aliados à redução de impactos ambientais.

1.1. OBJETIVOS

Este trabalho consiste num estudo à respeito dos aspectos ambientais, energéticos e econômicos da utilização de resíduos sólidos orgânicos para a produção de energia renovável a partir do processo de biodigestão anaeróbica.

Objetivos específicos:

- Caracterização do conhecimento científico e tecnológico através de uma revisão sistemática da literatura acerca do tema e de diferentes análises;

- Avaliação da viabilidade tecnológica e econômica do uso de resíduos sólidos orgânicos para conversão em energia térmica ou elétrica a partir de um estudo de caso. O estudo pretende avaliar os aspectos produtivos do processo de biodigestão, a redução de impacto ambiental resultante da utilização da tecnologia e, os aspectos econômicos que envolvem o investimento em um sistema comercial para operar com o lixo alimentar produzido pelo Restaurante Universitário (RU) da Universidade de Brasília.

1.2. METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos serão utilizadas duas metodologias específicas. A primeira é caracterizada em grande parte pela realização de uma revisão sistemática da literatura, conforme proposto por Cronin, Ryan e Coughlan (2008). Foram definidos critérios para a seleção dos textos que compõem o alicerce teórico do trabalho, e em seguida foram realizadas uma análise descritiva dos resultados, uma análise bibliométrica através do software SciMAT, e uma análise tecnológica acerca das patentes existentes relacionadas ao tema. A segunda metodologia consiste num estudo de caso no qual será feita uma coleta de dados e uma análise energética, ambiental e econômica para avaliar a implementação de um sistema comercial de biodigestão anaeróbica no RU através da comparação com dados encontrados na literatura científica, fornecidos pelo fabricante ou calculados.

1.3. ESTRUTURA

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, além das referências bibliográficas, conforme pode ser visto a seguir:

Capítulo 1: Introdução

- O primeiro capítulo é destinado à contextualização do trabalho, além da apresentação dos objetivos, metodologia e estrutura.

Capítulo 2: Revisão sistemática da literatura

- O segundo capítulo introduz os objetivos, metodologia e os critérios utilizados na realização da revisão sistemática da literatura, assim como os resultados da análise descritiva, da análise com o software SciMAT e da análise das tecnologias disponíveis..

Capítulo 3: Conceitos teóricos

- O terceiro capítulo apresenta os principais conceitos teóricos envolvidos no processo da biodigestão anaeróbica, assim como os aspectos ambientais e econômicos gerais que envolvem o processo, de forma a apoiar o estudo de caso realizado no capítulo seguinte.

Capítulo 4: Estudo de caso

- O quarto capítulo consiste no estudo de caso realizado para avaliar a implementação de um sistema comercial de biodigestão anaeróbica no RU. Aspectos como a produção de biogás, conversão de energia, redução de emissões e tempo de retorno do investimento são determinados com base na literatura e nos dados reunidos e, por fim, são discutidos.

Capítulo 5: Conclusão

- O quinto capítulo reúne todos os resultados obtidos e apresenta as considerações finais sobre o trabalho tendo em vista os objetivos e metodologias propostas.

2. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Para atingir o objetivo de se realizar o estudo e construir uma base de conhecimento sobre o aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos através do processo de biodigestão anaeróbica foi utilizada a técnica da revisão sistemática da literatura (RSL). Este método consiste em fornecer uma lista a mais completa possível de todos os estudos publicados relacionados a uma determinada área. Enquanto que revisões tradicionais tentam apenas resumir o resultado de uma série de estudos, a revisão sistemática utiliza-se de critérios explícitos e rigorosos para identificar, avaliar criticamente e sintetizar toda a literatura acerca de um determinado tópico (Cronin; Ryan e Coughlan, 2008). O uso desta técnica se torna importante pela possibilidade de formar uma base sólida para o avanço do conhecimento, facilitar o desenvolvimento de teorias e apontar direções nas quais ainda se faz necessário um esforço maior de pesquisa (Webster e Watson, 2002).

Além da RSL a partir da metodologia proposta por Cronin, Ryan e Coughlan (2008), será feita também uma análise bibliométrica utilizando o software SciMAT com a totalidade dos resultados obtidos na pesquisa. Este software de mapeamento científico de download gratuito incorpora métodos, algoritmos e medidas para todos os passos gerais do fluxo de trabalho do mapeamento científico. Além disso, permite ao usuário executar estudos baseados em várias redes bibliométricas e oferece, no modo de visualização, três interfaces que podem ser acessadas simultaneamente para visualização dos resultados (Cobo, 2012). Ao final da análise espera-se verificar as 10 publicações mais relevantes para o estudo, segundo os critérios definidos.

Existem essencialmente dois tipos de RSL quanto à maturidade do tema analisado, a primeira consiste no estudo de tópicos maduros, sobre os quais já existe uma vasta gama de pesquisas que necessitam de análise e síntese. A segunda, necessariamente mais curta, consiste na revisão sobre um tema emergente na literatura que será analisado com vários objetivos, entre eles determinar possíveis lacunas na pesquisa e oportunidades de produção científica (Webster e Watson, 2002). Como será visto mais adiante, o tema em questão neste trabalho se qualifica como o segundo tipo pois, apesar de ser uma tecnologia conhecida e amplamente difundida, apenas nas últimas décadas vem tendo o seu potencial explorado nas aplicações estudadas.

2.1. CRITÉRIOS ESTABELECIDOS

Segundo Cronin, Ryan e Coughlan (2008), algumas etapas precedem a revisão e critérios devem ser estabelecidos e esclarecidos pelo revisor. As etapas são I) determinar a pergunta de pesquisa; II) definir os critérios de inclusão e exclusão; III) selecionar e acessar a literatura; IV) avaliar a qualidade da literatura incluída na avaliação; V) analisar, sintetizar e divulgar os resultados. Tendo em vista todas essas considerações, as subseções a seguir apresentam os critérios utilizados.

2.1.1. DETERMINAÇÃO DA PERGUNTA DE PESQUISA

Qual o estado da arte e qual o potencial da tecnologia de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos através do processo de biodigestão anaeróbica?

2.1.2. CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

Foram considerados apenas artigos completos publicados em periódicos indexados na base de dados Scopus. Os principais critérios de seleção consistem na utilização de palavras-chave e operadores booleanos, não sendo definido um período específico, com a finalidade de estudar a evolução do tema desde o seu surgimento. As principais palavras-chave escolhidas foram *anaerobic digestion*, *municipal solid waste* e *energy efficiency*, pois relacionam os três pilares centrais da pesquisa, o processo de biodigestão anaeróbica, a utilização de resíduos sólidos urbanos e a finalidade de aproveitamento energético. Diversas variações foram incluídas afim de se evitar descartar documentos relevantes para o estudo sendo realizado. A estrutura completa da pesquisa com os operadores booleanos utilizados se encontra na Tabela 1.

Tabela 1. Palavras-chave utilizadas na primeira busca.

Palavras-chave	Número de resultados
(TITLE-ABS-KEY ("anaerobic digestion") AND TITLE-ABS-KEY ("municipal solid waste" OR "urban solid waste" OR "municipal organic waste" OR "urban organic waste" OR "urban waste") AND TITLE-ABS-KEY ("energy efficiency" OR "power generation" OR "energy generation" OR "electric power generation" OR "electricity generation"))	131

2.1.3. SELEÇÃO E ACESSO A LITERATURA

A base de dados Scopus foi escolhida pois possui um grande acervo de publicações acadêmicas revisadas, além de funcionalidades de apoio à análise de resultados, como identificação de autores, análise de citações e análise de publicações. A busca geral retornou apenas 131 resultados, o que evidencia o caráter emergente do tema estudado, enquadrando-o na segunda categoria de RSL mencionada anteriormente. Em seguida foi feita uma segunda busca, de forma a restringir ainda mais os resultados e eliminar artigos referentes a conferências, eventos, séries de livros ou publicações comerciais. Dos 131 artigos encontrados inicialmente restaram 92. A segunda busca efetuada pode ser vista na Tabela 2.

Tabela 2. Palavras-chave utilizadas na segunda busca.

Palavras-chave	Número de resultados
(TITLE-ABS-KEY ("anaerobic digestion") AND TITLE-ABS-KEY ("municipal solid waste" OR "urban solid waste" OR "municipal organic waste" OR "urban organic waste" OR "urban waste")) AND TITLE-ABS-KEY ("energy efficiency" OR "power generation" OR "energy generation" OR "electric power generation" OR "electricity generation")) AND (LIMIT-TO(DOCTYPE, "ar")) AND (LIMIT-TO(SRCTYPE, "j"))	92

2.1.4. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA LITERATURA

Os 92 artigos restantes foram avaliados quanto a classificação proposta pelo Qualis-Periódicos, que consiste num conjunto de procedimentos utilizados pela Capes para estratificação da qualidade da produção intelectual dos programas de pós-graduação. A classificação de periódicos é realizada pelas áreas de avaliação e passa por processo anual de atualização. Esses veículos são enquadrados em estratos entre A1 (mais alto) e C (mais baixo), tendo como intermediários os indicativos A2, B1, B2, B3, B4 e B5. De forma a embasar o trabalho futuro em critérios sólidos de qualidade foram escolhidos apenas os artigos classificados em periódicos nos estratos A1 e A2, com isso foram separados 59 dos 92 artigos previamente selecionados para uma análise mais profunda quanto ao conteúdo do texto. Em seguida foi feita uma análise das palavras-chave e do resumo (abstract) dos artigos restantes no intuito de dividi-los em três grupos baseado no enfoque do texto em relação ao tema principal: geração de energia através do aproveitamento dos resíduos sólidos pelo processo de biodigestão anaeróbica. A divisão tem como objetivo determinar quais artigos apresentam **foco direto** - o tema central desta pesquisa surge como tema central do trabalho – **foco geral** – o tema central desta pesquisa surge como um tema importante do contexto que envolve o estudo – **foco indireto** – o tema central desta pesquisa surge apenas como um componente relacionado ao estudo ou somente parte do tema central é abordado no texto.

2.1.5. ANÁLISE, SÍNTESE E DIVULGAÇÃO DOS RESULTADOS

Por fim a divisão resultou em 25 artigos que focam diretamente o tema central deste trabalho, 17 com foco geral e 13 classificados como foco indireto, 4 publicações foram excluídas por ter sido verificado que não destacam o processo da biodigestão anaeróbica no texto. Estes números podem ser vistos na Tabela 3. Foram então selecionados para compor a base teórica do trabalho e da pesquisa os 25 artigos obtidos na busca inicial publicados em revistas classificadas como A1 ou A2 pela Capes e que focam diretamente o tema estudado.

Tabela 3. Divisão dos artigos com relação ao foco.

Tipo de enfoque	Número de publicações
Foco direto	25
Foco geral	17
Foco indireto	13
Total	55

É possível observar que a maioria dos artigos focam diretamente o tema central deste trabalho, o que indica que as palavras-chave foram escolhidas de forma adequada no início da busca. A maioria das publicações de enfoque geral consiste em uma comparação entre as diversas tecnologias para produção de energia através de resíduos sólidos urbanos, como incineração ou células eletroquímicas, sem direcionar o estudo especificamente para a biodigestão anaeróbica, que surge como apenas mais um dos processos estudados. Os artigos classificados na categoria de foco indireto geralmente traziam uma abordagem direcionada apenas ao tratamento de lixo ou ao processo químico em si, sem se importar com a produção de energia ou com os subprodutos gerados.

Os resultados e análises foram efetuados de acordo com as metodologias especificadas e serão apresentados no próximo capítulo, assim como a caracterização de um sistema tecnológico de biodigestão anaeróbica.

2.1.6. SCIMAT

Uma das análises a ser realizada é a análise bibliométrica dos dados, para isso será utilizado o software SciMAT. Esta ferramenta livre desenvolvida na Universidade de Granada realiza mapeamentos científicos e incorpora métodos, algoritmos e medidas para todos os passos, desde o pré-processamento à visualização dos resultados. O software permite que o usuário realize diversos estudos baseados em diferentes redes bibliométricas, utilizando várias medidas de normalização e similaridade sobre os dados. Diferentes algoritmos de organização podem ser escolhidos, além de três principais formas de representação – diagramas estratégicos, redes de clusters e mapas de evolução – que são usados em conjunto, permitindo ao usuário melhor compreensão dos resultados (Cobo, 2012).

A ferramenta permite que se importe pesquisas realizadas em bases científicas como a Scopus, juntamente com informações sobre título, autor, referências e palavras-chave. Essas informações são guardadas em um módulo do programa chamado de *knowledge base*, ou base de conhecimento, onde podem ser gerenciadas, normalizadas, incluídas ou excluídas. A Figura 1 mostra a interface de gerenciamento de grupos de palavras-chave do programa. Uma vez normalizadas na base de conhecimento as palavras ou qualquer conteúdo a ser analisado, é imprescindível a determinação de períodos. Sem esta etapa o software não é capaz de alcançar resultados. A Figura 2 mostra a interface da base de conhecimento responsável por organizar os períodos para análise.

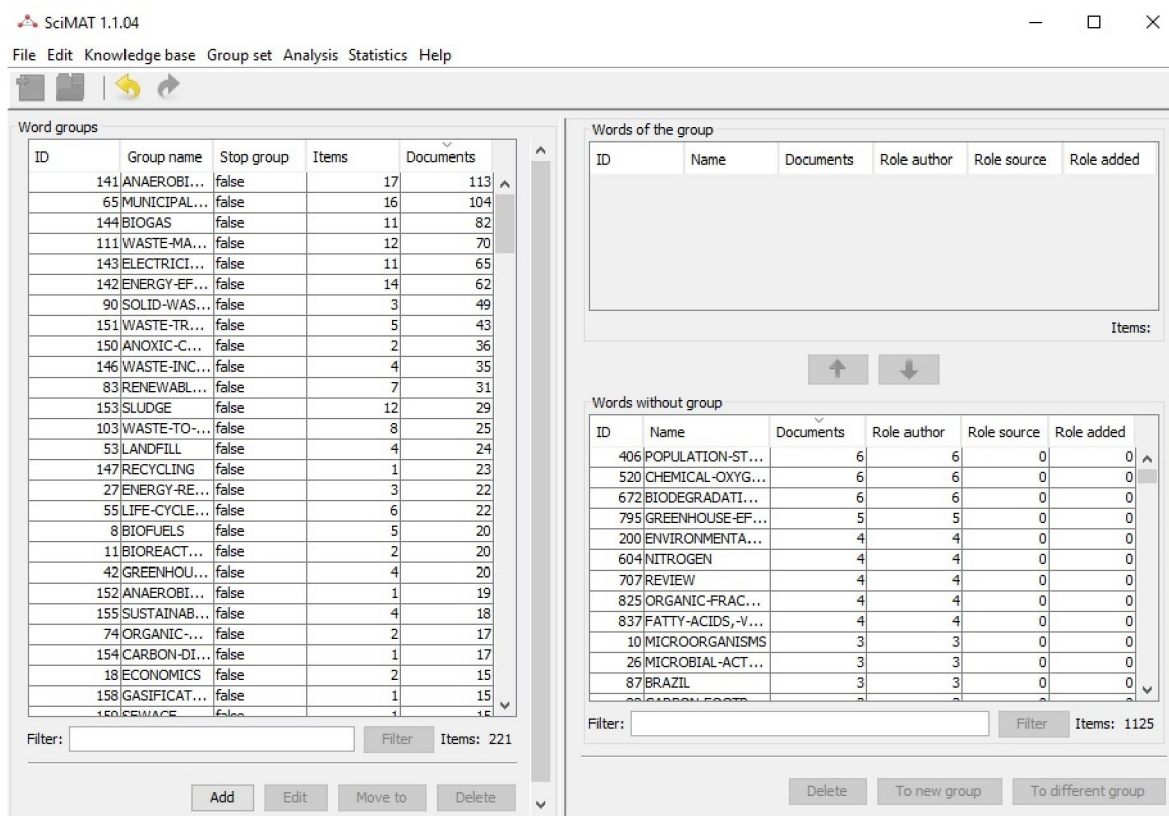


Figura 1. Interface de gerenciamento de palavras-chave do SciMAT.

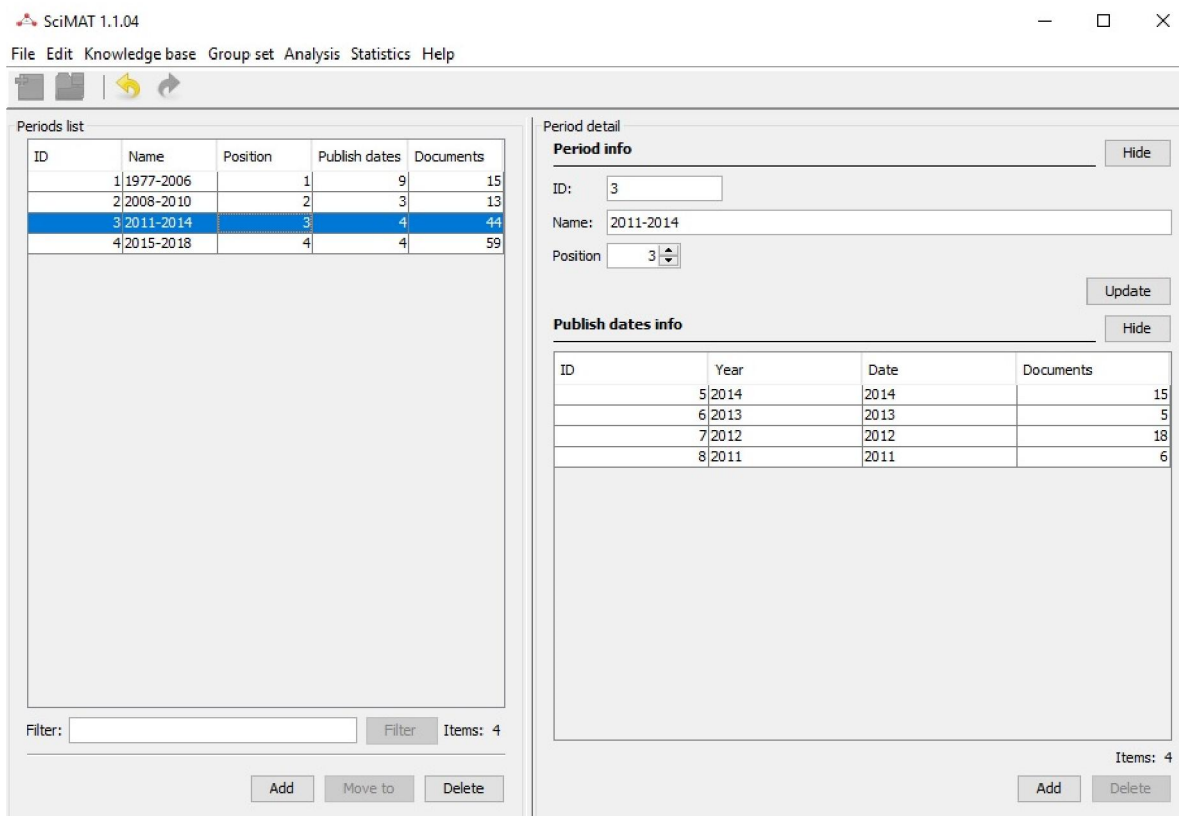


Figura 2. Interface de definição dos períodos de análise.

Após as etapas mencionadas é possível finalmente realizar a análise dos dados importados. Uma série de parâmetros devem ser definidos antes de gerar os resultados de acordo com a metodologia escolhida pelo usuário, como pode ser visto na coluna da esquerda na Figura 3.

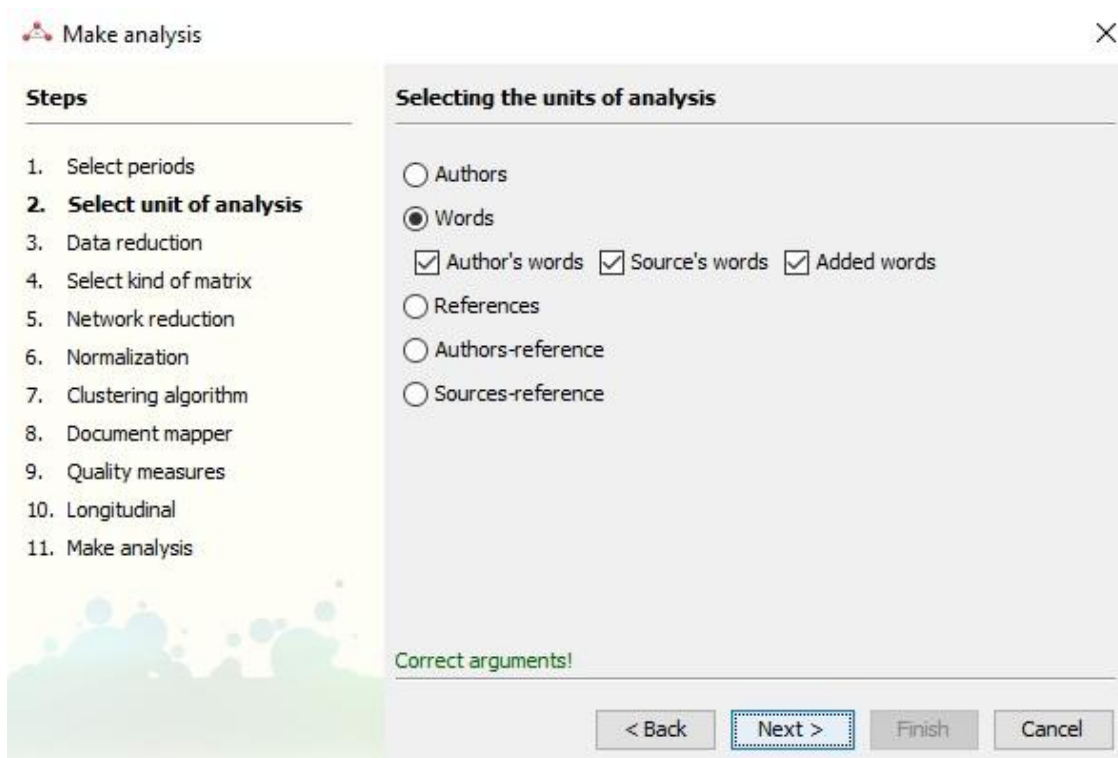


Figura 3. Interface de definição dos parâmetros de análise.

Após obtidos os mapas a pesquisa pode ser exportada e salva em dois diferentes formatos, como pode ser visto na Figura 4. Com isso os clusters gerados podem ser analisados mais a fundo, sendo possível ver quais os artigos mais importantes relacionados a determinada palavra-chave. Os métodos, algoritmos e parâmetros adotados no presente trabalho serão abordados e explicados mais adiante, juntamente resultados da revisão bibliográfica.

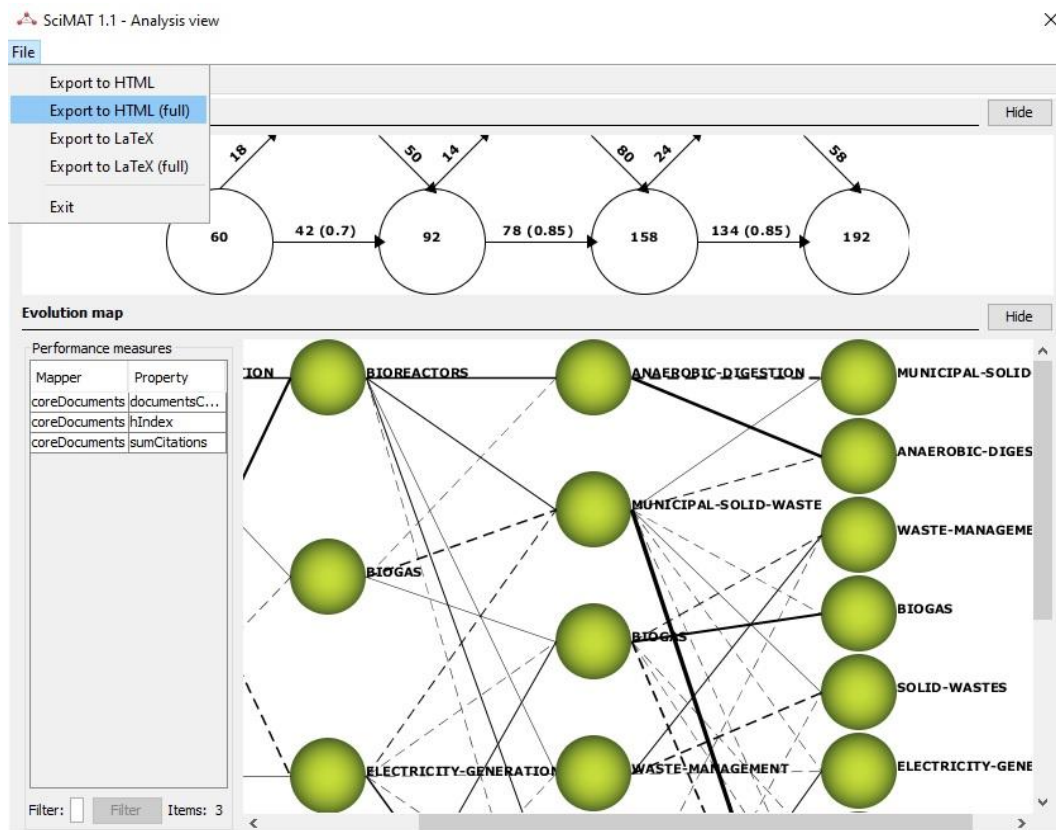


Figura 4. Interface para visualização dos resultados.

2.2. REVISÃO SISTEMÁTICA DO CONHECIMENTO CIENTÍFICO

Com base nas metodologias apresentadas foram feitas análises e construída uma base de conhecimento científico a respeito do tema em estudo, dividida em análise descritiva, que consiste numa análise simples, com resultados fornecidos pela própria base Scopus, na qual são observados números acerca das publicações por ano, autor, área, instituição, entre outros, e uma análise bibliométrica, mais complexa e que utiliza o software SciMAT para apresentar mapas científicos relacionando diferentes aspectos do tema. Ao fim serão analisados os dez principais artigos de acordo com os parâmetros adotados.

2.2.1. ANÁLISE DESCRITIVA

Na Figura 5 é possível verificar o aumento no número de publicações sobre biodigestão anaeróbica de RSU para conversão de energia ao longo dos anos. É notável o quão recente se observa o aumento no número de estudos, visto que aproximadamente 85% das publicações aconteceram a partir de 2010. Importante ressaltar que a pesquisa foi realizada no mês de maio de 2018 e que o número demonstrado ainda deverá aumentar consideravelmente.



Figura 5. Número de publicações por ano.

A Tabela 4 mostra os dez países com mais publicações e que são responsáveis por 70% do total. O país com maior número foram os Estados Unidos, seguido da Índia, em segundo lugar. O Brasil figura em sexto lugar, juntamente com a Espanha.

Tabela 4. Os dez países com maior número de publicações.

País	Número de publicações
Estados Unidos	15
Índia	13
Itália	11
Reino Unido	11
China	8
Brasil	7
Espanha	7
Singapura	6
Austrália	5
Irã	5
Total	88

A Tabela 5 apresenta as dez principais instituições com base no número de publicações. Importante notar que estas representam apenas 23% do total, revelando um caráter difuso no domínio do conhecimento acerca do tema. As duas principais instituições não estão no país responsável pelo maior número de artigos e a maioria possui apenas uma ou duas publicações na área.

Tabela 5. As dez instituições com maior número de publicações

Instituição	Número de publicações
National University of Singapore	5
Jadavpur University	4
Imperial College London	3
University College London	3
Tsinghua University	3
The Energy Group	3
Khalifa University	3
SLR Consulting Ltd	2
Biofuel Research Team	2
University of Manchester	2
Total	30

O caráter difuso do domínio sobre a temática é verificado novamente ao se tentar determinar os principais autores. Evangelisti, S. é o único autor com três publicações, enquanto que 92% do total possuem duas e pouco menos de 8% têm apenas uma. A Tabela 6 apresenta as dez principais revistas com base no número de publicações. Nota-se pelos títulos que a maioria possui foco na área de energia ou engenharia ambiental. As revistas mostradas são juntas responsáveis por 62 publicações, quase 50% do total.

Tabela 6. As dez revistas com maior número de publicações.

Título da revista	Número de publicações
Applied energy	11
Waste management	11
Renewable & sustainable energy reviews	8
Resources, conservation and recycling	6
Bioresource technology	6
Renewable energy	5
Waste management & research	5
Energy	4
Journal of cleaner production	3
Environmental science & technology	3
Total	62

A tendência das áreas de pesquisa verificadas na Tabela 6 se confirma novamente ao se analisar o gráfico da Figura 6. A maioria das publicações – mais de 57% – estão classificadas quanto a sua área como *ciências ambientais*, devido à maioria das aplicações para a tecnologia estarem relacionadas com o tratamento de resíduos. Além desta finalidade, normalmente também há o interesse no aproveitamento energético, o que justifica que mais de 45% das publicações se enquadrem na área de *energia*.

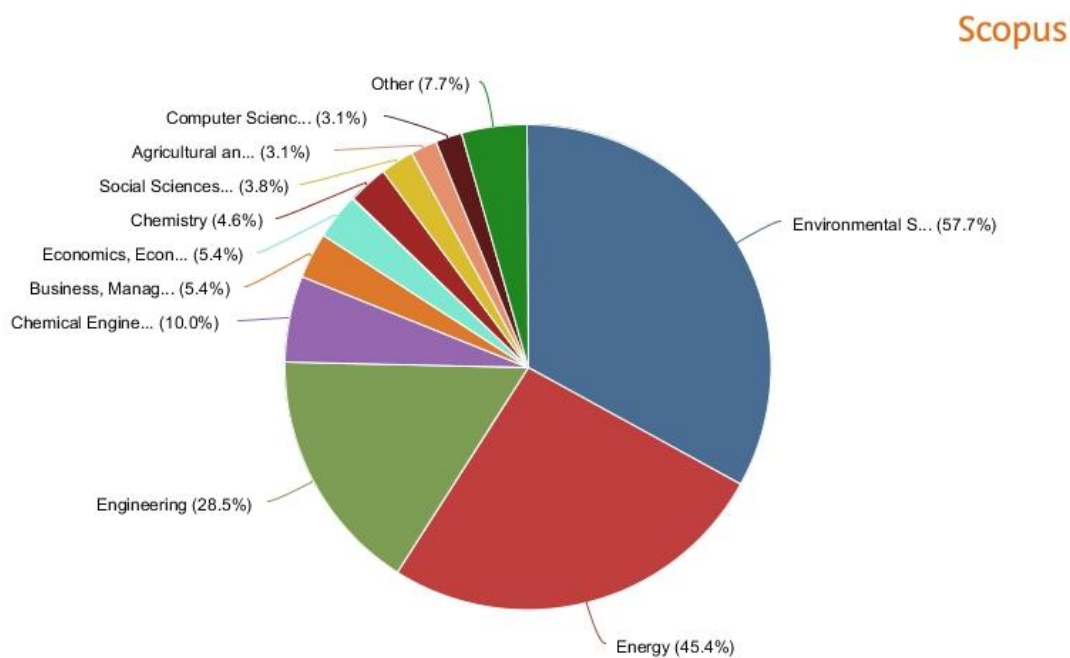


Figura 6. Classificação das publicações quanto a área.

2.2.2. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA COM O SCIMAT

A pesquisa realizada na etapa anterior foi exportada a partir do próprio endereço eletrônico da base e importado no software. O objetivo nesta etapa consiste em obter os mapas de sobreposição, evolução, diagrama estratégico – ou de Callon – além da rede de clusters formadas pelo algoritmo do próprio software, relacionando as principais palavras-chave e fornecendo uma lista dos principais artigos.

Após importar a pesquisa foram definidos os períodos a serem analisados, etapa imprescindível à análise com o SciMAT, e em seguida foi efetuada a normalização das palavras, que foram agrupadas conforme a similaridade dos seus significados relacionados ao tema, resultando em um total de 221 palavras-chave. Em seguida são apresentados os parâmetros escolhidos para a análise seguindo a metodologia estabelecida por Cavalcanti, 2016.

- a) Seleção dos períodos a serem analisados: foram selecionados os 4 períodos expostos no gráfico da Figura 7, fornecida pelo próprio software Scimat.
- b) Seleção da unidade de análise: palavras do autor, da fonte e palavras adicionadas foram as opções selecionadas;
- c) Redução dos dados: apenas o item que aparece em n documentos em determinado período será considerado. Para os dois primeiros períodos foi determinado o valor de 2, enquanto que para os dois últimos foi determinado 3;
- d) Seleção do modo no qual a rede será construída: concorrência;
- e) Redução da rede: somente os arcos com valor maior ou igual a n em determinado período serão levados em consideração. Foi definido o valor 2 para todos os períodos analisados;
- f) Seleção da medida de similaridade usada para normalizar a rede: índice de inclusão;
- g) Algoritmo de clustering usado para gerar o mapa e os clusters associados, ou sub-redes: O algoritmo calibrado foi o dos centros simples, com tamanho máximo de rede 10 e mínimo de 3;
- h) Seleção do mapeador de documentos usado na análise de performance: Core mapper;
- i) Seleção das medidas de desempenho e qualidade bibliométrica: foram escolhidas as medidas h-index – que avalia a relevância do autor através de um índice h , indicando que o autor publicou um número h de trabalhos que foram citados ao menos h vezes, cada – e sum citations – que avalia o total de citações do trabalho – de forma a medir o impacto bibliométrico das publicações;
- j) Seleção da medida de similaridade usada para construir o mapa de evolução e a sobreposição geral: foi selecionado o índice de inclusão para ambos;

- k) Execução das análises: etapa em que se conclui o processo de calibração e se efetua a análise.

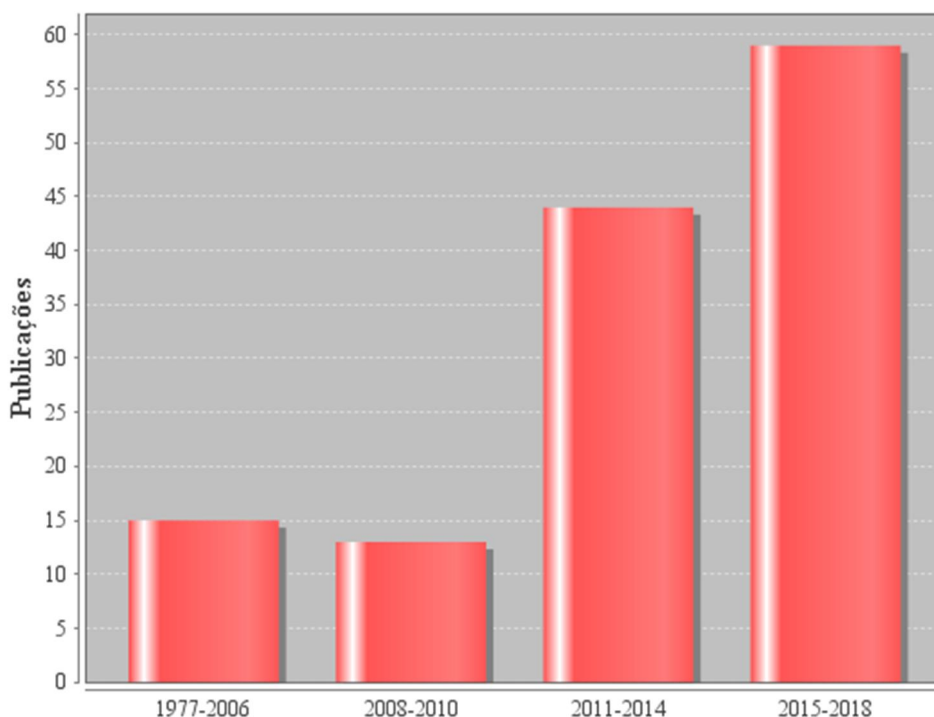


Figura 7. Períodos definidos para a análise bibliométrica.

Como um dos resultados, o SciMAT apresentou primeiramente o mapa de sobreposição da Figura 8. Nela é possível ver uma análise quantitativa acerca das palavras-chaves encontradas na pesquisa. O primeiro período, de 1977 a 2006, possui 60 palavras-chave enquanto que o segundo possui 92, das quais 42 são provenientes do período anterior. O terceiro período apresenta 158 palavras, das quais 78 vêm do segundo. Este aumento considerável nos números reflete o acréscimo observado no mesmo período na quantidade de publicações, conforme pode ser visto na Figura 5. O aumento continua sendo verificado durante o último período, que possui 192 palavras-chave, das quais 134 também estão presentes no terceiro. O crescente aumento nos números apresentados pela figura reflete o caráter emergente do tema, que começou a ser explorado mais amplamente apenas na última década.

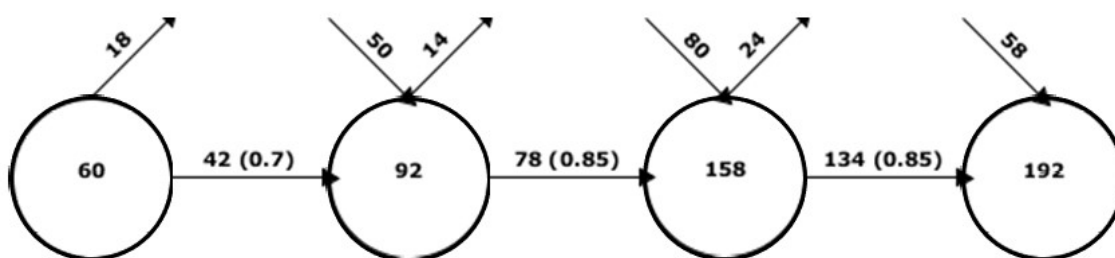


Figura 8. Mapa de sobreposição.

A Figura 9 consiste no mapa de evolução apresentado pela ferramenta. Diversas análises diferentes foram realizadas para que fosse possível compreender as relações entre as palavras-chave e agrupá-las de forma adequada quanto às suas similaridades. É possível observar o aumento na quantidade relevante de palavras relacionadas ao tema à medida em que se avançam os períodos. Este mapa foi gerado a partir da função complexa *h-index*.

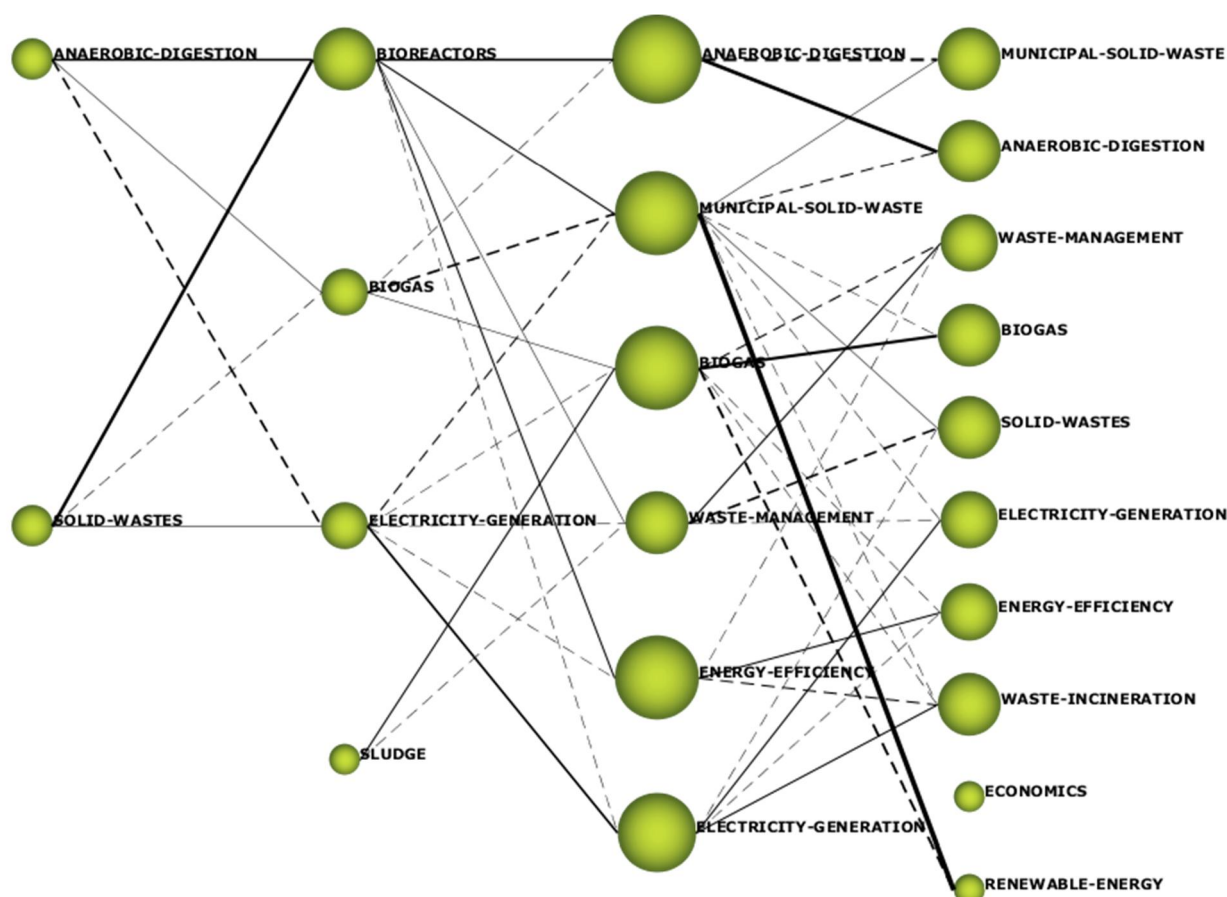


Figura 9. Mapa de evolução por h-index.

No mapa de evolução apresentado na Figura 9 é possível ver quatro temas centrais que se mantêm no topo durante os últimos dois períodos analisados: biodigestão anaeróbica, resíduos sólidos urbanos, gerenciamento de resíduos e biogás. Também se verifica como eles se conservam, indicando uma tendência na área. As palavras mencionadas se relacionam a diversas outras, formando sub-redes, também chamadas de clusters, que buscam ligar os temas de acordo com o algoritmo selecionado. Na Figura 10 está o cluster *anaerobic-digestion*, na Figura 11 *municipal-solid-waste*, na Figura 12 *waste-managent*, na Figura 13 *biogas*, na Figura 14 *electricity-generation* e na Figura 15 *energy-efficiency*. Os dois últimos clusters foram selecionados para representar a finalidade de conversão de energia neste trabalho.

O cluster **anaerobic-digestion** apresentou como documento de maior impacto o artigo *Developing Waste Biorefinery In Makkah: A Way Forward To Convert Urban Waste Into Renewable Energy*, do autor Nizami, A.S. Esta publicação foi feita na revista *Applied Energy*, em 2017 e foi citada 34 vezes. Os nodos conectados de maior peso são *gases, gas-production, greenhouse-gases, industrial-waste, landfill, manures, microbial-communities e municipal-waste*.

O cluster **municipal-solid-waste** apresentou como documento de maior impacto o mesmo artigo citado acima, e os principais nodos são *agricultural-wastes, biofuels, bioreactors, costs, effluents, energy-recovery, energy-resource, fertilizers e fuels*.

O cluster **waste-management** apresentou como documento de maior impacto o artigo *Food Waste-to-energy Conversion Technologies: Current Status And Future Directions*, do autor Pham, T.P.T. Esta publicação foi feita na revista *Waste Management*, em 2015 e foi citada 73. Os nodos conectados de maior peso são *developing-countries, organic-compound, wastewater, combustion, gasification, digestibility, food-waste, optimization, waste-water-management*.

O cluster **biogas** apresentou como documento de maior impacto o mesmo artigo citado acima, e os principais nodos são *organic-pollutant, substrates, wastes, anaerobiosis, sewage, energy-yield, fermentation, water-treatment-plants, sewage-pumping-plants*.

O cluster **electricity-generation** apresentou como documento de maior impacto o mesmo artigo dos clusters *anaerobic-digestion e municipal-solid-waste*. Os nodos conectados de maior peso são *waste-disposal-facility, organic-matter, waste-to-energy e emission-control*.

O cluster **energy-efficiency** apresentou como documento de maior impacto o mesmo artigo dos clusters *waste-management e biogas*. Os nodos conectados de maior peso são *biomass, water-treatment, efficiency, wastewater-treatment-plant*.

A Tabela 7 sintetiza as informações expostas acima.

Tabela 7. Publicações de maior impacto e principais nodos dos clusters selecionados.

Cluster	Publicação de maior impacto	Principais nodos
Anaerobic-digestion	NIZAMI, A.S., SHAHZAD, K., REHAN, M., OUDA, O.K.M., KHAN, M.Z., ISMAIL, I.M.I., ALMEELBI, T., BASAHI, J.M., DEMIRBAS, A., Developing Waste Biorefinery In Makkah: A Way Forward To Convert Urban Waste Into Renewable Energy. Applied Energy 186:null 189-196 (2017). Times cited: 34	gas-production, greenhouse-gases, industrial-waste, landfill, manures, microbial-communities e municipal-waste
Municipal-solid-waste	NIZAMI, A.S., SHAHZAD, K., REHAN, M., OUDA, O.K.M., KHAN, M.Z., ISMAIL, I.M.I., ALMEELBI, T., BASAHI, J.M., DEMIRBAS, A., Developing Waste Biorefinery In Makkah: A Way Forward To Convert Urban Waste Into Renewable Energy. Applied Energy 186:null 189-196 (2017). Times cited: 34	agricultural-wastes, biofuels, bioreactors, costs, effluents, energy-recovery, energy-resource, fertilizers e fuels
Waste-management	PHAM, T.P.T., KAUSHIK, R., PARSHETTI, G.K., MAHMOOD, R., BALASUBRAMANIAN, R., Food Waste-to-energy Conversion Technologies: Current Status And Future Directions. Waste Management 38:1 399-408 (2015). Times cited: 73	developing-countries, organic-compound, wastewater, combustion, gasification, digestibility, food-waste, optimization, waste-water-management
Biogas	PHAM, T.P.T., KAUSHIK, R., PARSHETTI, G.K., MAHMOOD, R., BALASUBRAMANIAN, R., Food Waste-to-energy Conversion Technologies: Current Status And Future Directions. Waste Management 38:1 399-408 (2015). Times cited: 73	organic-pollutant, substrates, wastes, anaerobiosis, sewage, energy-yield, fermentation, water-treatment-plants, sewage-pumping-plants
Electricity-generation	NIZAMI, A.S., SHAHZAD, K., REHAN, M., OUDA, O.K.M., KHAN, M.Z., ISMAIL, I.M.I., ALMEELBI, T., BASAHI, J.M., DEMIRBAS, A., Developing Waste Biorefinery In Makkah: A Way Forward To Convert Urban Waste Into Renewable Energy. Applied Energy 186:null 189-196 (2017). Times cited: 34	waste-disposal-facility, organic-matter, waste-to-energy e emission-control
Energy-efficiency	PHAM, T.P.T., KAUSHIK, R., PARSHETTI, G.K., MAHMOOD, R., BALASUBRAMANIAN, R., Food Waste-to-energy Conversion Technologies: Current Status And Future Directions. Waste Management 38:1 399-408 (2015). Times cited: 73	biomass, water-treatment, efficiency, wastewater-treatment-plant

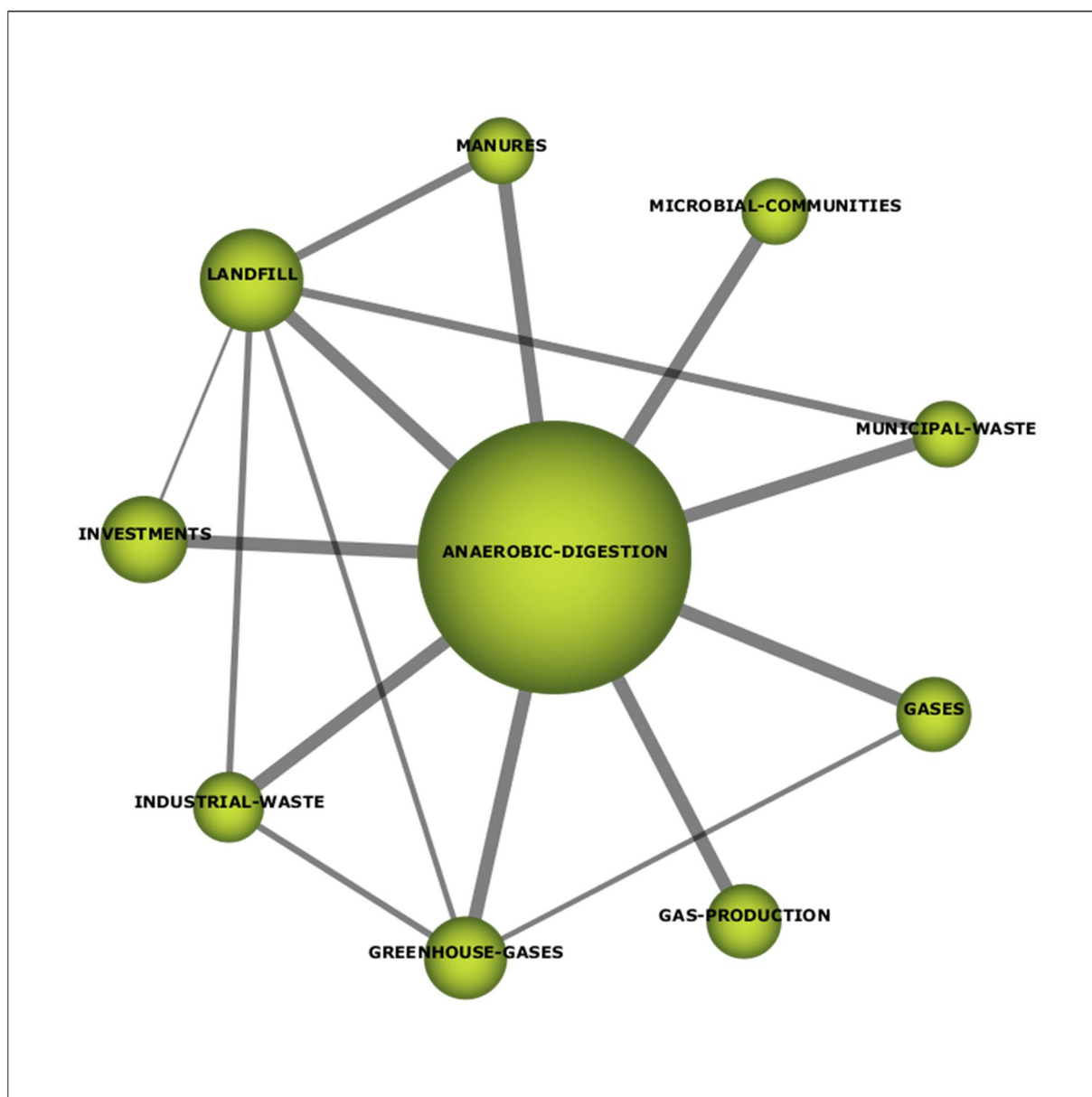


Figura 10. Cluster anaerobic-digestion por h-index.

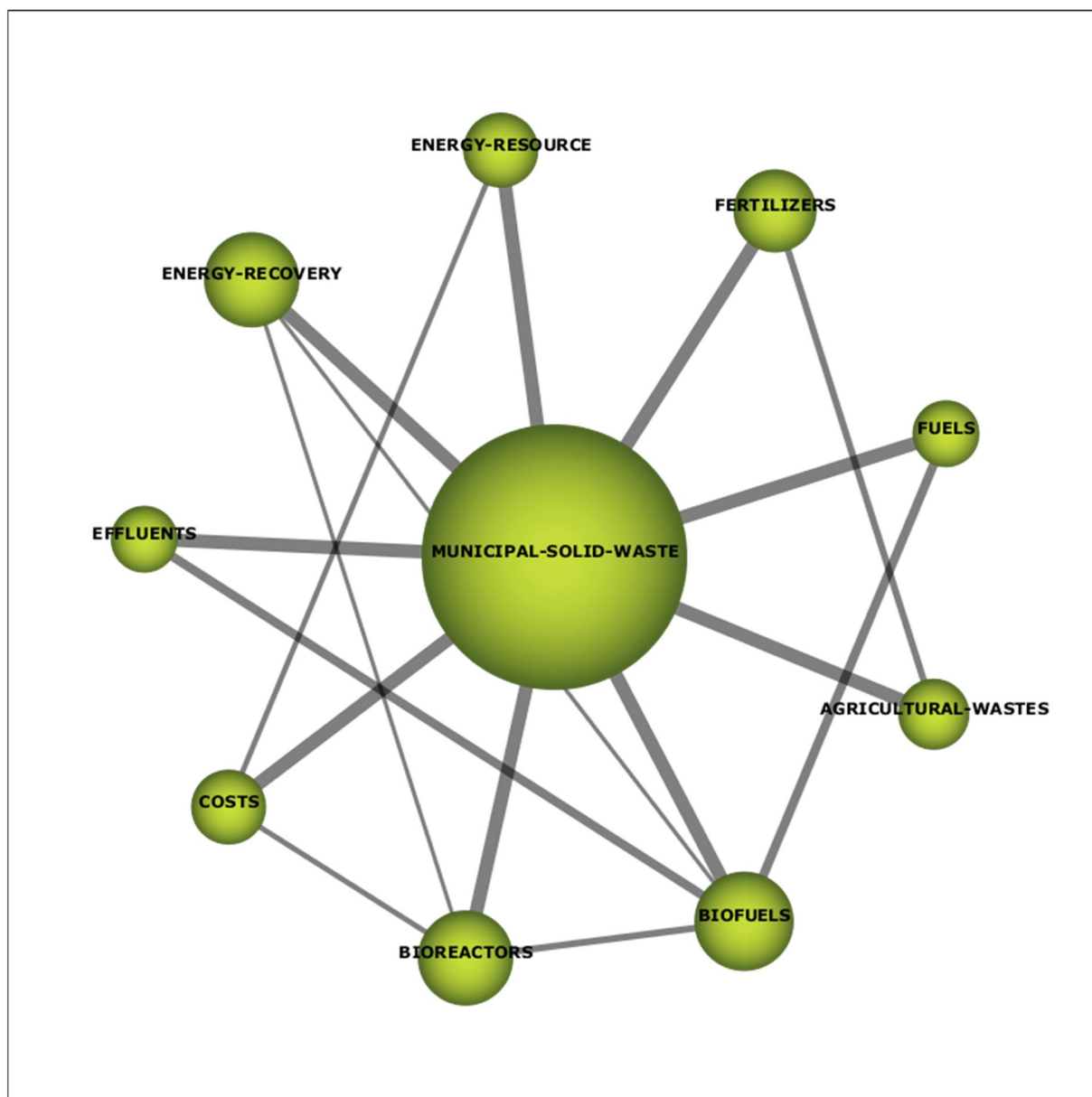


Figura 11. Cluster municipal-solid-waste por h-index.

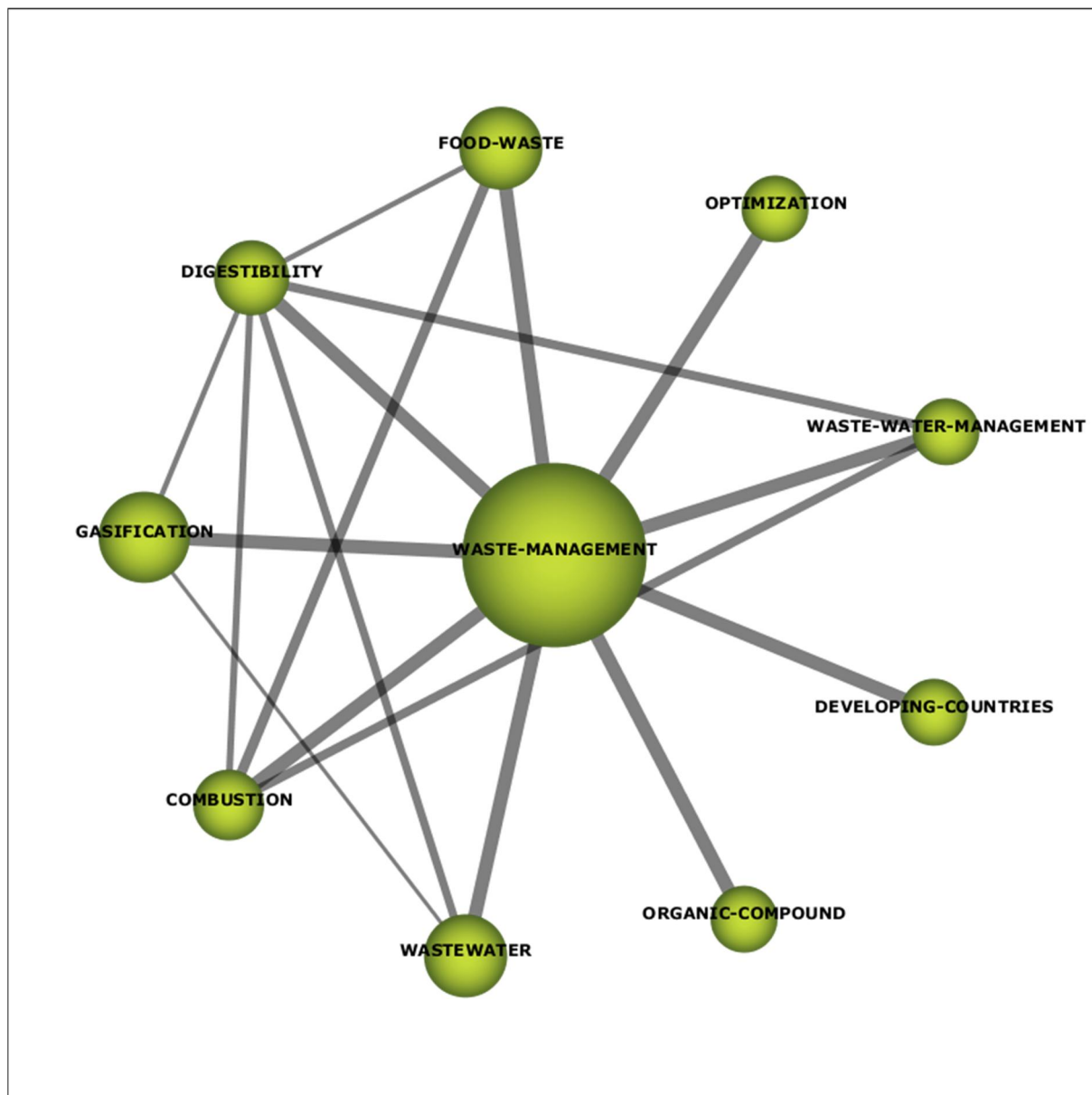


Figura 12. Cluster waste-management por h-index.

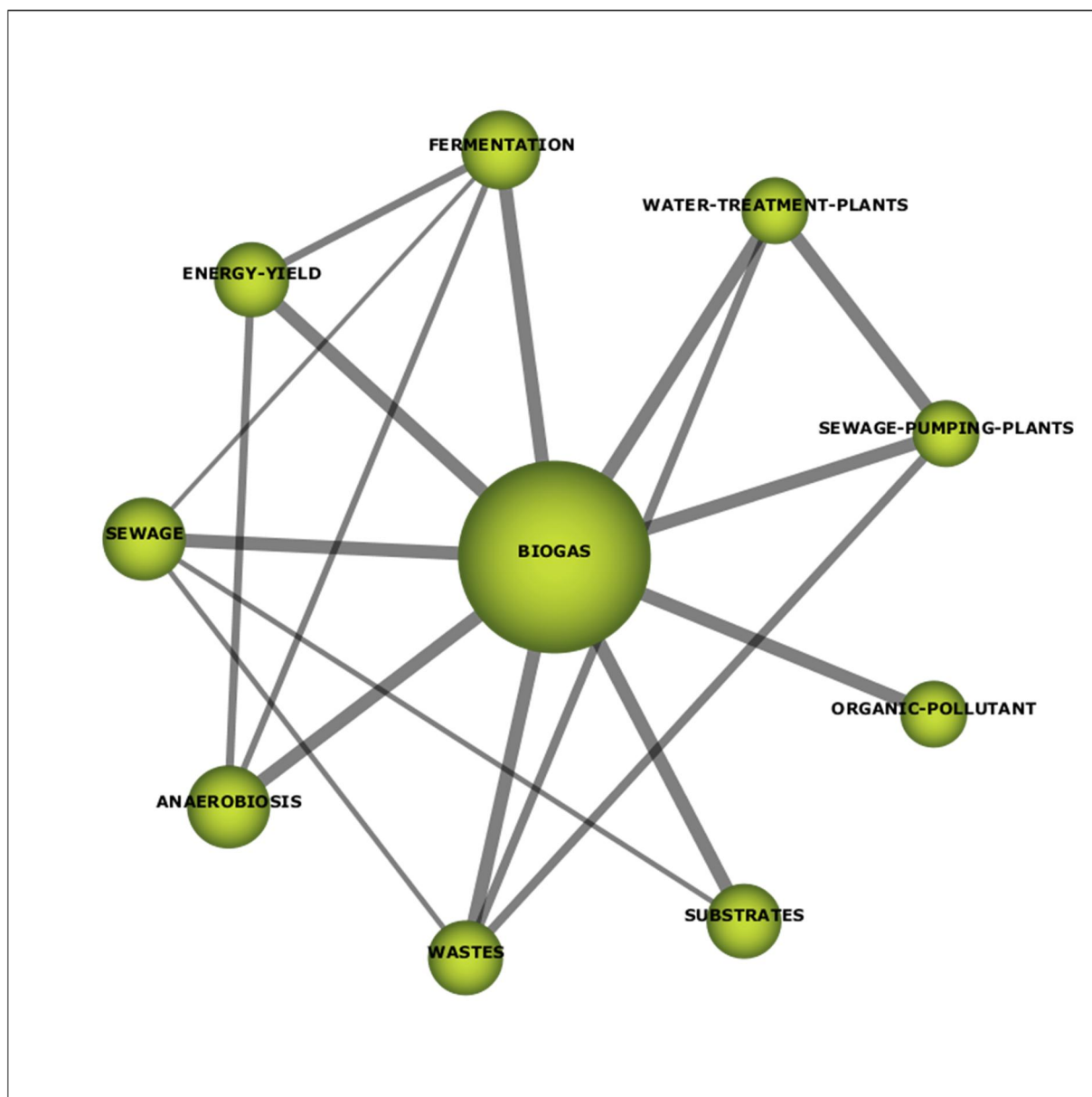


Figura 13. Cluster biogas por h-index.

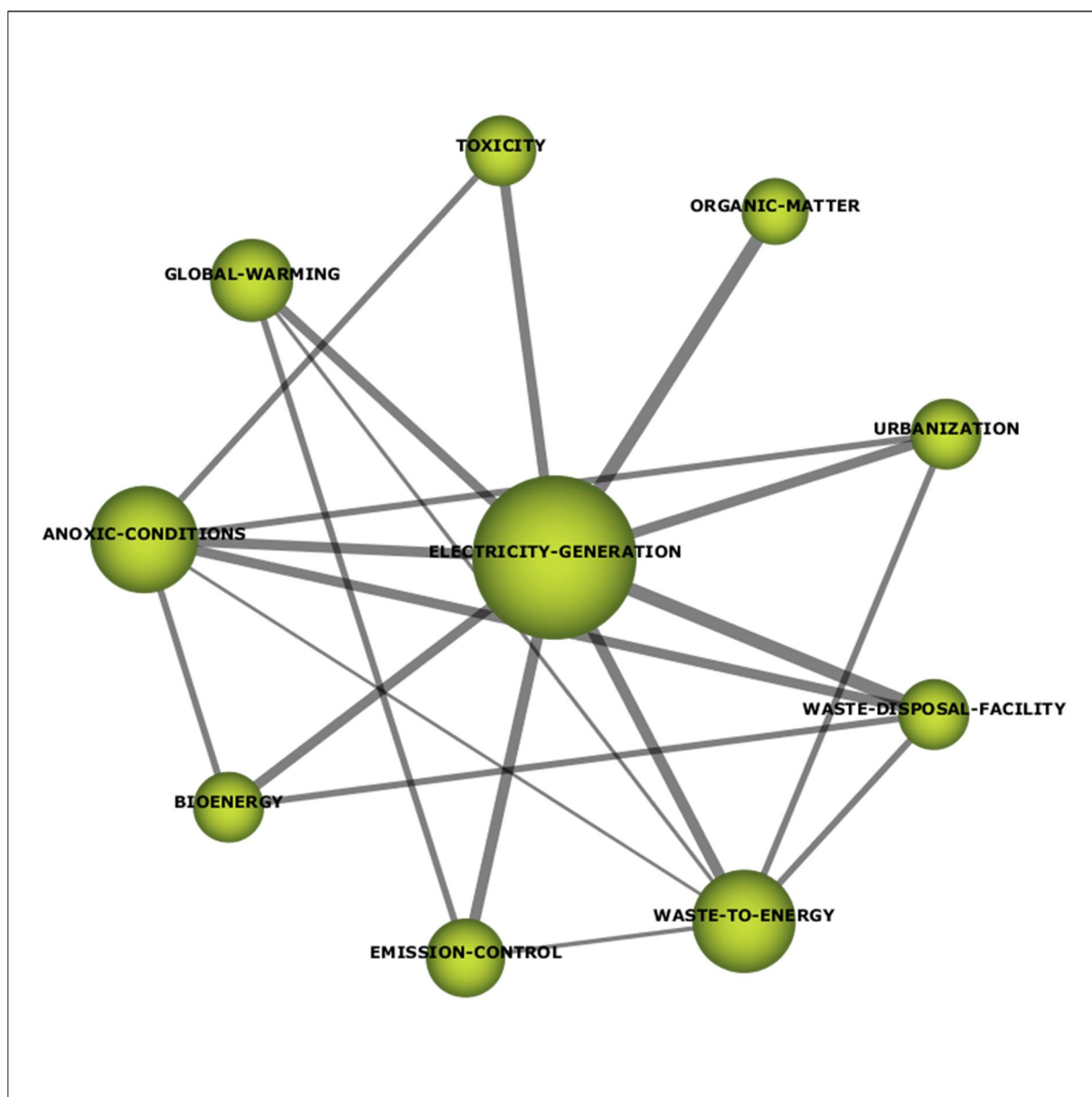


Figura 14. Cluster electricity-generation por h-index.

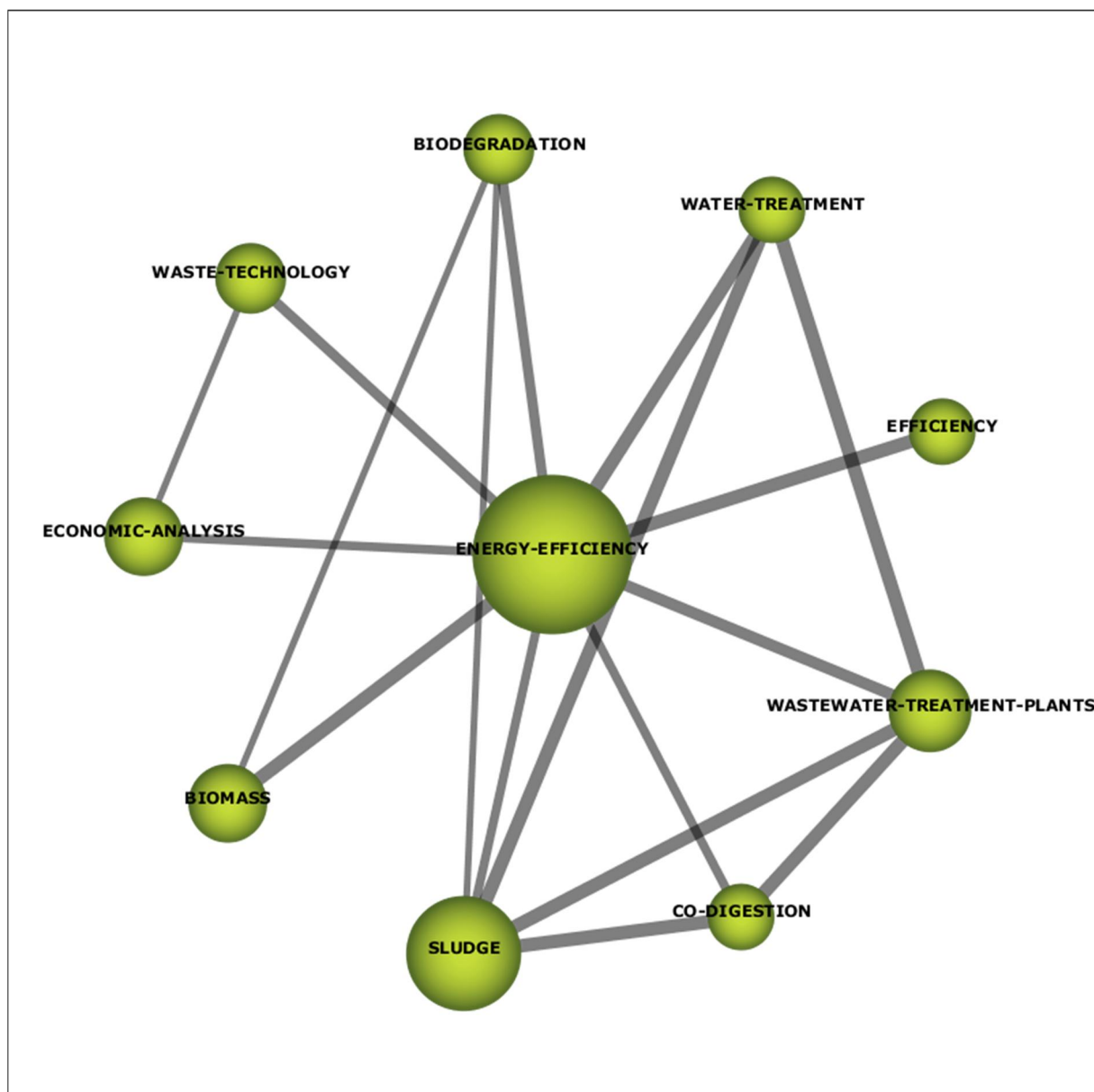


Figura 15. Cluster energy-efficiency por h-index.

Além dos gráficos e figuras exibidos, o SciMAT apresenta também o diagrama estratégico – ou de Callon – que organiza as palavras-chave conforme a sua densidade e centralidade na pesquisa analisada. Foi novamente utilizada a medida h-index, que avalia primariamente o impacto bibliométrico das publicações. As palavras nos clusters acima estão dispostas entre os quatro quadrantes do diagrama estratégico na Figura 16.

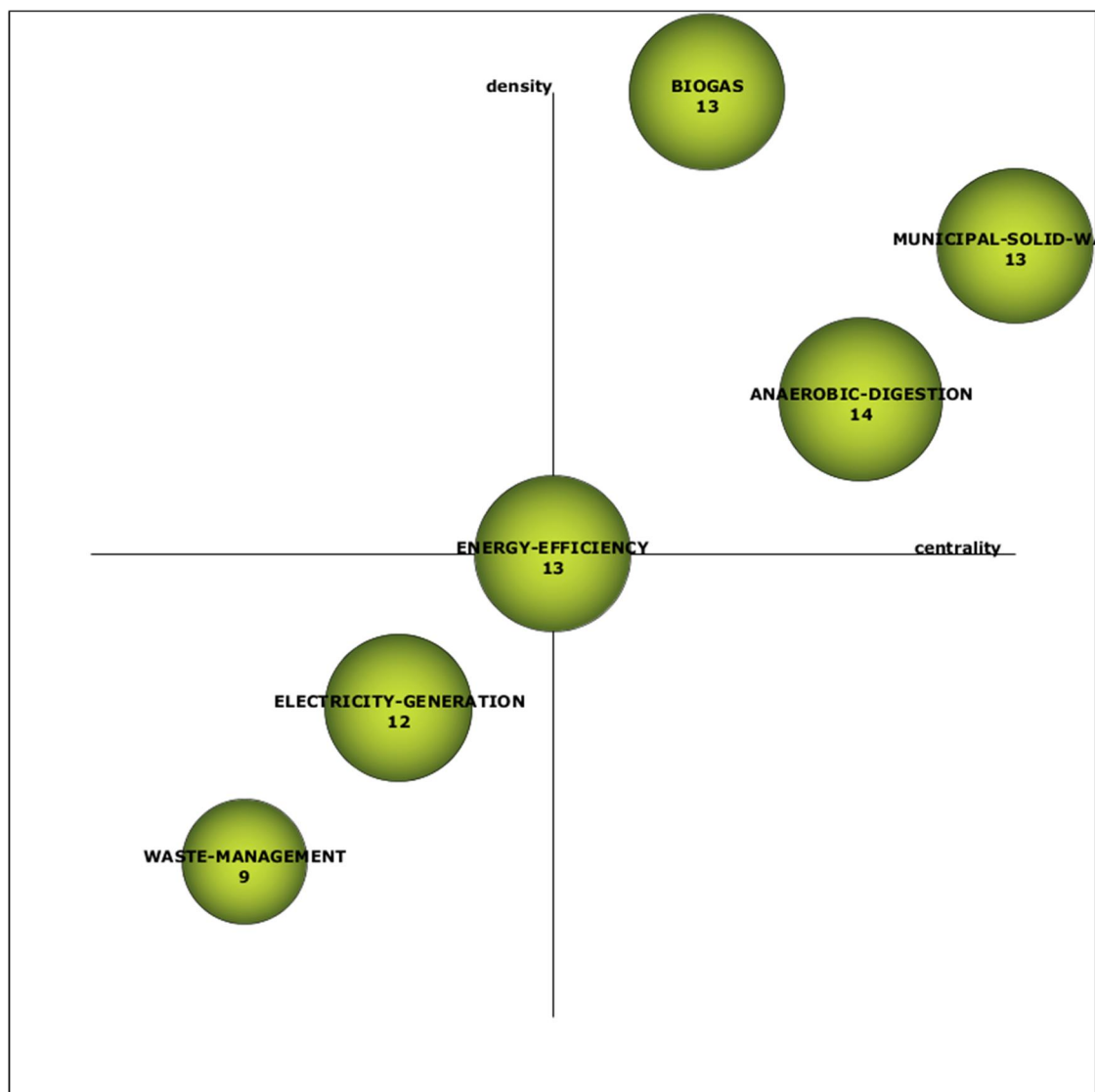


Figura 16. Diagrama estratégico por h-index para os seis clusters principais.

No gráfico é possível observar no primeiro quadrante os clusters *anaerobic-digestion*, *municipal-solid-wastes* e *biogas*, essa posição indica uma alta centralidade e densidade dessas palavras-chave. Também se verifica uma alta quantidade de publicações nesses clusters, que se destacam como temas motores nos estudos analisados. A menor centralidade e densidade indica aspectos secundários nas demais palavras, porém o alto número de publicações reforça a importância desses temas.

Após terem sido obtidos os mapas científicos fornecidos pelo SciMAT a pesquisa foi salva e exportada no formato *HTML* para que pudesse ser feita a análise dos clusters escolhidos e obtidos os 10 principais artigos, de acordo com os parâmetros adotados. Foram escolhidos os mesmos 6 clusters apresentados previamente e foi considerado o período mais recente para a análise. Para cada palavra-chave foram selecionadas as dez principais publicações, e no final foram selecionados os artigos que mais foram mencionados ao longo dos diferentes clusters. Como critério de desempate para artigos que se repetiam um mesmo número de vezes foi utilizado o número de citações. Os resultados estão dispostos na Tabela 8.

Tabela 8. Os dez principais artigos em função do número de menções, segundo análise bibliométrica realizada pelo SciMAT.

Artigos	Número de menções
AICHINGER, P., WADHAWAN, T., KUPRIAN, M., HIGGINS, M., EBNER, C., FIMML, C., MURTHY, S., WETT, B., Synergistic Co-digestion Of Solid-organic-waste And Municipal-sewage-sludge: 1 Plus 1 Equals More Than 2 In Terms Of Biogas Production And Solids Reduction. <i>Water Research</i> 87:null 416-423 (2015). Times cited: 20	5
EBNER, J.H., LABATUT, R.A., RANKIN, M.J., PRONTO, J.L., GOOCH, C.A., WILLIAMSON, A.A., TRABOLD, T.A., Lifecycle Greenhouse Gas Analysis Of An Anaerobic Codigestion Facility Processing Dairy Manure And Industrial Food Waste. <i>Environmental Science And Technology</i> 49:18 11199-11208 (2015). Times cited: 12	5
BONK, F., BASTIDAS-OYANEDEL, J.-R., SCHMIDT, J.E., Converting The Organic Fraction Of Solid Waste From The City Of Abu Dhabi To Valuable Products Via Dark Fermentation - Economic And Energy Assessment. <i>Waste Management</i> 40:null 82-91 (2015). Times cited: 12	5
SANTOS, I.F.S.D., BARROS, R.M., TIAGO FILHO, G.L., Electricity Generation From Biogas Of Anaerobic Wastewater Treatment Plants In Brazil: An Assessment Of Feasibility And Potential. <i>Journal Of Cleaner Production</i> 126:null 504-514 (2016). Times cited: 14	4
RÓZSENBERSKI, T., KOÓK, L., BAKONYI, P., NEMESTÓTHY, N., LOGROÑO, W., PÉREZ, M., URQUIZO, G., RECALDE, C., KURDI, R., SARKADY, A., Municipal Waste Liquor Treatment Via Bioelectrochemical And Fermentation Processes: Assessment Of Various Technological Sequences. <i>Chemosphere</i> 171:null 692-701 (2017). Times cited: 14	4
BREUNIG, H.M., JIN, L., ROBINSON, A., SCOWN, C.D., Bioenergy Potential From Food Waste In California. <i>Environmental Science And Technology</i> 51:3 1120-1128 (2017). Times cited: 8	4

PHAM, T.P.T., KAUSHIK, R., PARSHETTI, G.K., MAHMOOD, R., BALASUBRAMANIAN, R., Food Waste-to-energy Conversion Technologies: Current Status And Future Directions. Waste Management 38:1 399-408 (2015). Times cited: 73	3
NIZAMI, A.S., SHAHZAD, K., REHAN, M., OUDA, O.K.M., KHAN, M.Z., ISMAIL, I.M.I., ALMEELBI, T., BASAHI, J.M., DEMIRBAS, A., Developing Waste Biorefinery In Makkah: A Way Forward To Convert Urban Waste Into Renewable Energy. Applied Energy 186:null 189-196 (2017). Times cited: 34	3
YARI, M., MEHR, A.S., MAHMOUDI, S.M.S., SANTARELLI, M., A Comparative Study Of Two Sofc Based Cogeneration Systems Fed By Municipal Solid Waste By Means Of Either The Gasifier Or Digester. Energy 114:null 586- 602 (2016). Times cited: 14	3
LI, W., GUO, J., CHENG, H., WANG, W., DONG, R., Two-phase Anaerobic Digestion Of Municipal Solid Wastes Enhanced By Hydrothermal Pretreatment: Viability, Performance And Microbial Community Evaluation. Applied Energy 189:null 613-622 (2017). Times cited: 11	3

2.2.3. ANÁLISE DE CONTEÚDO DOS TEXTOS SELECIONADOS

Nesta seção os textos selecionados pela análise bibliométrica com o Scimat e dispostos na Tabela 8 são analisados quanto ao seu conteúdo. Como é observado, parte dos artigos trata do processo bioquímico da biodigestão enquanto outros tratam do potencial de geração de energia a partir dos resíduos sólidos urbanos em determinada localidade, dois textos selecionados são incompatíveis com o tema estudado por não tratarem do tema central e um consiste em uma revisão tradicional da literatura.

Aichinger, P., Wadhawan, T., Kuprian, M., Higgins, M., Ebner, C., Fimml, C., Murthy, S., Wett, B. - Synergistic co-digestion of solid-organic-waste and municipal-sewage-sludge: 1 plus 1 equals more than 2 in terms of biogas production and solids reduction.

O processo de co-digestão consiste no principal objeto de estudo deste trabalho, com foco na sinergia química entre os influentes de esgoto e resíduos orgânicos urbanos utilizados, o que origina o título acima. O artigo explora parâmetros relacionados da co-digestão com o objetivo de se aumentar a produção de metano enquanto se limitam os efeitos negativos que podem surgir da mistura dos dois influentes. Inicialmente o autor apresenta uma introdução abordando o contexto atual da utilização de biodigestores anaeróbicos em estações de tratamento de esgoto (ETEs) no mundo, assim como os desafios no uso da co-digestão, relacionados principalmente à interação dos microorganismos participantes do processo. No segundo capítulo são descritos de forma criteriosa todos os materiais, métodos e características das ETEs analisadas, ambas localizadas na região de Tirol, na Austria. Após a realização de todos os testes, medições e simulações propostas o texto reafirma a importância da co-digestão de resíduos orgânicos em ETEs, não somente devido à infraestrutura já existente, mas também devido ao aumento da eficiência na geração de biogás. A primeira instalação estudada apresentou um

índice de auto-suficiência energética de até 110%, enquanto que a segunda poderia ser utilizada como uma provedora de recursos energéticos, atingindo um índice de 160% de energia produzida com relação à energia consumida. Apesar dos números satisfatórios obtidos, ao final é enfatizada a necessidade de políticas de incentivo à produção sustentável de energia devido aos preços baixos praticados no modelo atual de geração.

Ebner, J.H., Labatut, R.A., Rankin, M.J., Pronto, J.L., Gooch, C.A., Williamson, A.A., Trabold, T.A. - Lifecycle greenhouse gas analysis of an anaerobic codigestion facility processing dairy manure and industrial food.

O estudo tem como objetivo analisar parâmetros de impacto ambiental para um biodigestor anaeróbico que codigere esterco e resíduos alimentares industriais (RAI) em uma fazenda de produção de leite. Os dados a respeito da matéria de entrada, operação do digestor e propriedades do efluente foram combinados com parâmetros regionais para realizar uma estimativa dos impactos gerados pelos gases estufa emitidos em uma instalação de biodigestão anaeróbica no nordeste dos Estados Unidos. Foi utilizada a metodologia de análise de ciclo de vida, considerando tanto as emissões diretas (CH_4 , N_2O e CO_2 liberados por processos bioquímicos ou combustão) quanto as indiretas (geradas durante todo o ciclo de vida dos materiais e energia utilizados, além das emissões evitadas devido ao uso do processo em análise). Dois casos diferentes foram modelados pelo autor, um caso de referência e o caso da codigestão, no primeiro os resíduos são coletados, transportados e eliminados de formas típicas na região, enquanto que no segundo os resíduos alimentares são transportados para o biodigestor, combinados com o esterco do local, produzindo o biogás utilizado para conversão em energia elétrica, que por sua vez é exportada para a rede. Após definir e explanar todos os parâmetros adotados para as análises, o autor apresenta os resultados comparando os dois casos em termos de toneladas de CO_2 equivalente emitidos por ano e quilogramas de CO_2 por tonelada de matéria tratada. Os resultados evidenciam a eficiência do processo ao se verificar que há uma redução de 71% das emissões de gases estufa (4512 t CO_2 /ano ou 37.5 kg CO_2 e/t matéria processada). Se observou que a maior contribuição se deve à substituição das emissões associadas à rede, além disso o benefício de se evitar a deposição de rejeitos em aterros (1926 t CO_2 e/ano) supera facilmente o impacto do transporte desses resíduos para o digestor (129 t CO_2 e/ano). A análise final do autor destaca os principais fatores responsáveis pela redução das emissões, como a utilização de rejeitos com alto impacto relativos ao seu descarte, controle nas emissões do digestor e gerenciamento das emissões relacionadas ao armazenamento do digestato.

Bonk, F., Bastidas-Oyanedel, J.-R., Schmidt, J.E. - Converting the organic fraction of solid waste from the city of Abu Dhabi to valuable products via dark fermentation - Economic and energy assessment.

Este artigo não trata da biodigestão anaeróbica clássica, tendo como foco principal apenas o processo de fermentação (*dark fermentation*). Apesar de também ser um processo bioquímico, este ocorre na ausência de luz e não apresenta a etapa de metanogênese, gerando produtos diferentes como ácidos

graxos voláteis e hidrogênio. Neste caso o objetivo final não consiste na geração de energia, mas na venda dos produtos obtidos, de forma a substituir as tradicionais formas de deposição do lixo na cidade de Abu Dhabi, nos Emirados Árabes. Devido ao foco indireto no tema do presente trabalho este artigo não foi analisado mais detalhadamente.

Santos, I.F.S.D., Barros, R.M., Tiago Filho, G.L. - Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment plants in Brazil: an assessment of feasibility and potential.

A única publicação brasileira selecionada ao final da análise bibliométrica tem como primeiro autor Ivan Felipe Silva dos Santos, da Universidade Federal de Itajubá, em Minas Gerais. O estudo tem como objetivo analisar o potencial energético e a viabilidade do uso do biogás gerado em estações de tratamento de esgotos (ETEs), além do tamanho da população necessário para viabilizar economicamente as instalações. Inicialmente é apresentada uma revisão do conhecimento referente ao tema, a relevância do estudo e os objetivos do trabalho, na segunda parte o autor apresenta a metodologia utilizada, as equações e considerações principais feitas para a obtenção dos resultados apresentados na etapa seguinte. Foram obtidos números para a produção do biogás em vários cenários referentes a municípios brasileiros, diferenciados pelo número de habitantes e, em seguida foram analisadas duas tecnologias para a conversão de energia: a utilização de motores baseados no ciclo Otto e microturbinas a gás. Para o primeiro caso, no qual se usa motores com ciclo Otto para conversão do biogás em energia elétrica, os cálculos indicam que se atinge um retorno financeiro apenas em estações de tratamento que atendem ao menos 300.000 habitantes, não sendo economicamente viável em municípios com população menor. No segundo caso, a microturbina a gás não apresenta uma alternativa economicamente viável em nenhum cenário adotado, demandando tarifas de distribuição de energia elétrica muito acima dos atuais valores. Em ambas as análises o autor destaca a importância da existência de políticas de estímulo ao desenvolvimento de tecnologias de energias renováveis, como a utilização de créditos de carbono, para que se possa promover a descentralização da geração de energia elétrica, evitando custos com perdas por transmissão. Ao final são discutidas sugestões para a implementação de ETEs com geração de energia a partir do biogás, como o estabelecimento de consórcios entre municípios menores de forma a tornar o empreendimento mais interessante do ponto de vista econômico, além disso é destacada a possibilidade de redução da população mínima de 300.000 habitantes em cenários economicamente e tecnologicamente mais favoráveis.

Rózsenszki, T., Koók, L., Bakonyi, P., Nemestóthy, N., Logroño, W., Pérez, M., Urquiza, G., Recalde, C., Kurdi, R., Sarkady, A. - Municipal waste liquor treatment via bioelectrochemical and fermentation processes: assessment of various technological sequences.

O foco deste trabalho reside nos processos químicos de biodigestão anaeróbica, fermentação e célula de combustível biológica. O autor apresenta primeiramente uma comparação entre a utilização dos três

diferentes processos bioquímicos para o tratamento de efluentes líquidos urbanos e posterior geração de energia. A segunda etapa do artigo consiste na apresentação da metodologia utilizada, parâmetros adotados e material utilizado. Como material de entrada para todas as análises foi considerada a fração líquida dos resíduos de esgoto mesofílicos anaeróbicos provenientes de uma usina de biogás em Pálhalma, Hungria. Além da análise dos processos individualmente foram feitas as combinações de biodigestão anaeróbica com fermentação, célula de combustível biológica com fermentação e dos três em conjunto. Ao final de todas as análises das tecnologias foram utilizados um critério ambiental e um energético para compará-las: remoção da demanda química de oxigênio e rendimento energético específico, respectivamente. Para o critério ambiental o processo que se mostrou mais eficiente foi o da célula de combustível, seguido pela biodigestão e fermentação. Já para o segundo critério a ordem se mostra invertida, com a fermentação apresentando a maior eficiência, seguido da biodigestão e da célula combustível. Foi observado que individualmente nenhum dos processos se mostra capaz de remover matéria orgânica e produzir energia simultaneamente, portanto de modo a contornar essas limitações o autor propõe combinações de dois ou mais processos. Nestes casos a produção de energia ocorre de forma significativa apenas na fermentação e biodigestão, sendo a célula combustível usada principalmente para a redução da demanda química de oxigênio dos efluentes. Estas combinações podem representar uma eficiente solução para o tratamento da matéria orgânica e geração de energia, porém o autor destaca a necessidade de estudos futuros para se discutir as implicações práticas e a eficiência da célula de combustível biológica.

Breunig, H.M., Jin, L., Robinson, A., Scown, C.D. - Bioenergy potential from food waste in California.

Este artigo analisa o potencial para conversão de resíduos alimentares em energia elétrica e térmica no estado da Califórnia, nos Estados Unidos. O objetivo é determinar a quantidade, locais e variações temporais na geração de resíduos alimentares para criar um modelo regional e subanual do potencial de geração de calor e eletricidade, além de estudar o papel de políticas locais e de tecnologias disponíveis na superação de desafios associados à utilização de resíduos alimentares. Inicialmente são estudados as capacidades instaladas e disponíveis para tratamento de resíduos a partir dos processos de biodigestão anaeróbica e combustão, utilizados para rejeitos com altos e baixos conteúdos de umidade, respectivamente. Em seguida são analisados os potenciais de conversão em energia térmica e elétrica dos produtos resultantes dos processos citados anteriormente, considerando fatores como capacidade instalada, transporte, armazenamento e eficiência energética. Os resultados mostram que entre 37 e 99% dos resíduos sólidos alimentares com alto teor de umidade podem ser convertidos em energia elétrica e térmica se forem utilizadas instalações existentes no estado, enquanto que apenas um máximo de 55% de resíduos com baixo teor de umidade podem ser convertidos caso fossem processados utilizando a biodigestão. Essa alta variação reflete as incertezas a respeito da capacidade excedente para codigestão nas usinas, além da falta de informações acerca da geração e composição de resíduos, e capacidade operacional das instalações de biodigestão anaeróbica. A autora reforça a importância da disponibilidade

de dados a respeito dos diversos fatores que influenciam o processo e reafirma a necessidade de alternativas para a centralização do tratamento de resíduos alimentares em grandes centros urbanos, visto que apenas o tratamento em pequenas escalas, como casas e fazendas, não será suficiente para lidar de forma eficiente com o problema do gerenciamento de rejeitos orgânicos.

Pham, T.P.T., Kaushik, R., Parshetti, G.K., Mahmood, R., Balasubramanian, R. - Food waste-to-energy conversion technologies: current status and future directions.

O artigo consiste numa tradicional revisão da literatura acerca das atuais tecnologias para conversão de resíduos de alimentos em energia, na qual não são apresentados os critérios utilizados na pesquisa. O autor apresenta no primeiro capítulo uma revisão geral sobre o problema da deposição de resíduos orgânicos, o potencial de aproveitamento energético e de redução de emissões. Restos de alimentos compoem uma porção considerável dos resíduos sólidos urbanos (entre 25-75%, a depender do local), visto que cerca de um terço da produção é perdida ou desperdiçada, considerando o consumo final. No segundo capítulo as tecnologias de conversão de lixo em energia são apresentadas e divididas em tecnologias biológicas (biodigestão anaeróbica e fermentação) e termoquímicas (incineração, pirólise, gaseificação e carbonização hidrotérmica). Para cada tecnologia são destacados os avanços recentes, atuais eficiências alcançadas na prática e os desafios ainda existentes na área, como o elevado tempo de residência e o pré-tratamento da matéria orgânica sendo processada pela biodigestão anaeróbica. No terceiro capítulo é apresentado um resumo e uma comparação das tecnologias apresentadas, com destaque para a vantagem dos processos bioquímicos em relação aos demais devido à possibilidade de processar com facilidade resíduos com alto teor de umidade a baixos custos. Apresenta um resumo de todas as comparações feitas em relação a parâmetros como redução de emissões, poluição da água e ar, produção de energia e custo relativo.

Nizami, A.S., Shahzad, K., Rehan, M., Ouda, O.K.M., Khan, M.Z., Ismail L, I.M.I., Almeelbi, T., Basahi, J.M., Demirbas, A. - Developing waste biorefinery in Makkah: A way forward to convert urban waste into renewable energy.

O artigo estuda o benefício econômico, energético e ambiental da instalação de uma biorefinaria para tratamento de resíduos sólidos urbanos e produção de energia elétrica na cidade de Makkah, na Arábia Saudita, utilizando diversas tecnologias como biodigestão anaeróbica, pirólise, transesterificação e combustível sólido recuperado. Anualmente a cidade é palco de um dos maiores e mais antigos encontros religiosos do mundo durante os meses de peregrinação e Ramadan, nos quais o país recebe mais de 2 milhões de fiéis de 183 países. A maior parte do lixo produzido é disposta em aterros sem os aparatos necessários para redução de danos ambientais ou coleta do gás produzido, resultando na contaminação do solo, água e na emissão de altas quantidades de gases de efeito estufa. Primeiramente é feita uma análise da geração, quantidade e composição dos resíduos em Makkah, relacionadas diretamente com os períodos e eventos religiosos que acontecem no local. Foram utilizados dados de instituições locais acerca dos rejeitos, que foram divididos em categorias de acordo com as suas

composições e subsequente destinos. A fração correspondente a resíduos alimentares seria destinada ao processo de biodigestão anaeróbica, resultando em metano, enquanto que as gorduras presentes seriam destinadas ao processo de transesterificação, produzindo glicerol e biodiesel. Os resíduos plásticos se destinariam para a pirólise, produzindo combustível líquido, papel, couro, madeira e outros componentes seriam recuperados para conversão em combustíveis sólidos, enquanto que os demais materiais poderiam ser reciclados ou reutilizados. As instalações utilizando as tecnologias propostas resultariam em uma economia anual de 87.6 milhões de riais árabes (SAR) em créditos de carbono. O desenvolvimento da refinaria juntamente com a reciclagem de resíduos produziriam uma receita líquida total de 758 milhões SAR divididos entre geração de energia e desvio de aterros. Além disso as instalações poderiam economizar 1.95 milhões de barris de petróleo e 11.2 milhões de MCF (milhões de pés cúbicos de gás natural). Uma redução em GWP de 1.15 milhões de toneladas de CO₂ equivalente poderia ser alcançada, constituindo uma série de benefícios econômicos e ambientais para a cidade, o que poderia ser replicado de forma similar em outros locais da Arábia Saudita. É importante ressaltar que o autor não faz nenhuma análise tecnológica à respeito da escala da aplicação estudada, desconsiderando a dimensão do fluxo de resíduos que, segundo o próprio artigo chega a centenas de milhares de toneladas, constituindo um desafio sem precedentes caso se deseje o total aproveitamento dos rejeitos.

Yari, M., Mehr, A.S., Mahmoudi, S.M.S., Santarelli, M. - A comparative study of two SOFC based cogeneration systems fed by municipal solid waste by means of either the gasifier or digester.

Este artigo trata de sistemas de célula combustível do tipo óxido sólido produzindo calor e eletricidade (cogeração) a partir de gás de síntese e biogás. A utilização dos dois diferentes combustíveis é comparada dos pontos de vistas termodinâmico e econômico através de balanços de energia, exergia e de custos. Foi feita uma modelagem utilizando o software Engineering Equation Solver (EES) e verificado que para conversão apenas de energia elétrica a utilização do biogás proveniente de um digestor apresenta uma maior eficiência de primeira lei (40.14% versus 20.31% do gás de síntese), porém para a cogeração de energia elétrica e térmica o gás de síntese se apresenta como mais eficiente (58.75% versus 51.05% do biogás). Por não mencionar o processo de biodigestão anaeróbica, a publicação não será analisada de forma mais detalhada devido ao seu foco indireto no tema central deste trabalho.

Li, W., Guo, J., Cheng, H., Wang, W., Dong, R. - Two-phase anaerobic digestion of municipal solid wastes enhanced by hydrothermal pretreatment: viability, performance and microbial community evaluation.

O artigo tem por objetivo estudar o uso de pré-tratamento hidrotérmico para incrementar a produção de biogás a partir de resíduos sólidos urbanos. A viabilidade do processo é incerta devido às diferentes interações químicas que ocorrem na matéria orgânica a ser tratada. Para isso foram analisadas a produção

de biogás com e sem o pré-tratamento em digestores de um e dois estágios. Na introdução o autor apresenta brevemente o contexto da utilização da biodigestão no mundo, assim como o pré-tratamento hidrotérmico. Em seguida são apresentados os métodos e equações utilizados, assim como parâmetros de operação dos equipamentos e tipo de resíduos sólidos. Foram discutidos e comparados no terceiro capítulo diversas características dos processos químicos como a performance da acidogênese e metanogênese, influência do pH na fermentação, estrutura dos conjuntos de microorganismos na acidogênese e viabilidade na combinação do pré-tratamento com a biodigestão em duas fases. Entre as conclusões, foi verificado que a performance do processo estudado pode ser aumentada em 31.5% ao se utilizar o pré-tratamento hidrotérmico em conjunto com o digestor de duas fases, porém não foi observada melhora no digestor de uma fase. Balanços de energia indicaram que o pré-tratamento em conjunto com a biodigestão em duas fases pode aumentar a geração de energia em 50.5-97.4% em comparação com o processo mais simples.

2.3. REVISÃO DO CONHECIMENTO TECNOLÓGICO

Além da revisão do conhecimento científico também foi feito um estudo descritivo sobre o estado atual da tecnologia de biodigestão anaeróbica. Foram feitas buscas na *Patentscope*, com o objetivo de se fazer uma análise descritiva similar à da seção 2.2.1. Esta base pertence à WIPO – World Intellectual Property Organization – um fórum global de serviços e políticas sobre propriedade intelectual, membro da ONU, localizado na Suíça e que dispõe de mais de 72 milhões de documentos de patentes. Ao contrário das pesquisas realizadas até o momento, foram usadas apenas palavras chaves relacionadas à tecnologia de biodigestão anaeróbica, o que retornou 3698 resultados, como mostra a Tabela 9.

Tabela 9. Palavras-chave utilizadas na busca pela base de dados Patentscope.

Palavras-chave	Número de resultados
FP:("anaerobic digestion" OR "anaerobic digester")	3698

O gráfico da Figura 17 mostra uma tendência similar às observadas na análise descritiva e bibliométrica. Na última década pode ser observado um crescimento no número de registros menor do que o crescimento nas publicações científicas apesar da tendência similar, considerando que mais de 50% dos registros foram feitos após 2010.

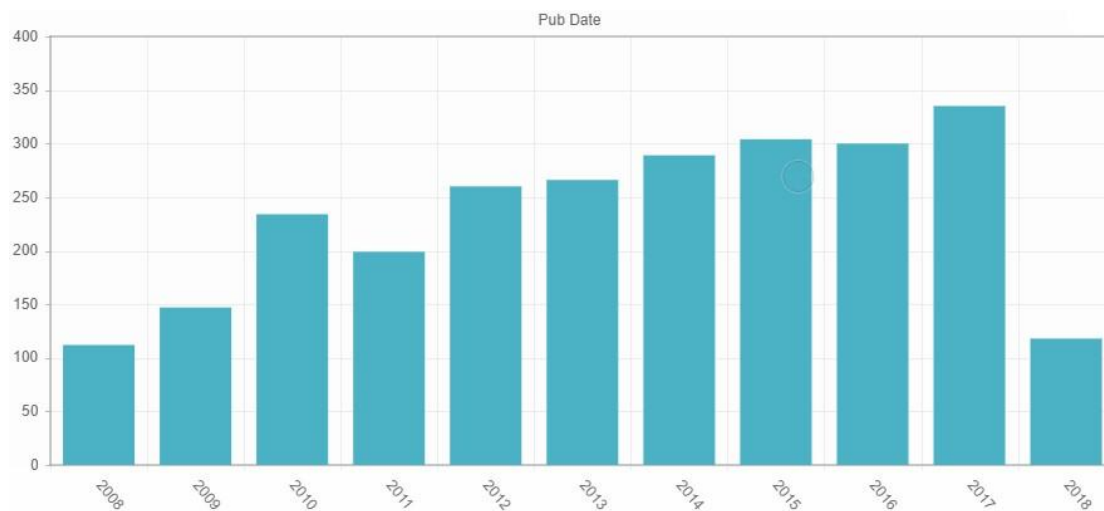


Figura 17. Distribuição do número de patentes por ano.

De forma semelhante à tendência observada anteriormente, a distribuição entre os países também indica uma concentração do número de patentes, porém neste caso os dez países com maior número de registros são responsáveis por 94% do total, evidenciando uma concentração muito superior. A China é responsável por 24% das patentes, enquanto que os Estados Unidos possuem 17%. Na Tabela 10 PCT representa o Tratado de Cooperação de Patentes e, os demais países responsáveis pelo maior número de registros estão dispostos.

Tabela 10. Os dez países com maior número de patentes.

País	Número de patentes
China	902
Estados Unidos	626
Coréia do Sul	500
PCT	416
Instituto de Patentes Europeu	268
Japão	266
Canadá	191
Austrália	114
Reino Unido	108
Índia	96
Total	3487

Na distribuição de patentes quanto às instituições responsáveis é observado um caráter mais difuso, visto que as dez maiores responsáveis pelos registros detêm apenas 6% do total. Uma diferença notável em relação às instituições responsáveis pelas publicações científicas é a diminuição no número de universidades e o aumento no número de empresas ligadas a energia, manejo de resíduos e sustentabilidade. As dez instituições com o maior número de patentes estão dispostas na Tabela 11.

Tabela 11. As dez instituições com o maior número de patentes.

Instituição	Número de patentes
Anaergia Inc	62
Ebara Corp	42
Kurita Water Ind Ltd	29
Tongji University	19
Mitsubishi Kakoki Kaisha Ltd	16
Jiangnan University	15
National Institute of Advanced Industrial & Technology	15
Degremont	12
Hideken Sekkei	12
General Electric Company	11
Total	233

2.4. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA TECNOLÓGICO

Como visto anteriormente, o processo de biodigestão anaeróbica para aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos ainda se encontra numa fase de desenvolvimento imatura se comparada a outras tecnologias com finalidade semelhante. Apesar do potencial inexplorado, o sistema já é utilizado e comercializado em diversas escalas, em diversos países. Soluções completas para aplicações agrícolas, domésticas e comerciais, como em supermercados ou restaurantes, podem ser facilmente encontradas, e algumas delas serão apresentadas a seguir.

A empresa israelense *Homebiogas* produz e comercializa um sistema próprio para produção de biogás a partir dos resíduos de uma única residência. O produto, que pode ser visto na Figura 18, consiste

num pequeno biodigestor que pode consumir até 12 litros de resíduos alimentares ou 40 litros de esterco animal por dia para produzir gás e fertilizante. Cada litro de lixo produz até 200 litros de gás, suficiente para alimentar um fogão por uma hora (Homebiogas, 2018). O produto pode ser enviado para montagem no local e a empresa fornece também aparelhos como fornos e lâmpadas, que operam com biogás.



Figura 18. Sistema unitário de biodigestão anaeróbica (Fonte: Homebiogas).

Para aplicações residenciais em maior escala ou até mesmo aplicações comerciais na qual há considerável disponibilidade de resíduos orgânicos, algumas empresas como a chinesa *Puxintech* e a britânica *Seab Energy* disponibilizam sistemas embutidos em contêineres com todos os equipamentos necessários para a produção de biogás. A Figura 19 demonstra o detalhamento das partes do sistema de tratamento anaeróbico inserido em um contêiner de 40 pés de comprimento, comercializado pela *Puxintech*. Segundo o fabricante, o sistema é capaz de digerir uma quantidade de até 250 kg de resíduos alimentares por dia, produzindo até 20 m³ de gás. Os números na figura representam: 1. Dessulfurizador; 2. Bomba de biogás; 3. Desidratador; 4. Console; 5. Triturador de resíduos alimentares; 6. Reatores anaeróbicos de primeiro estágio; 7. Bolsa de armazenamento de biogás; 8. Bomba de circulação; 9. Reatores anaeróbicos de segundo estágio; 10. Contêiner de 40 pés.

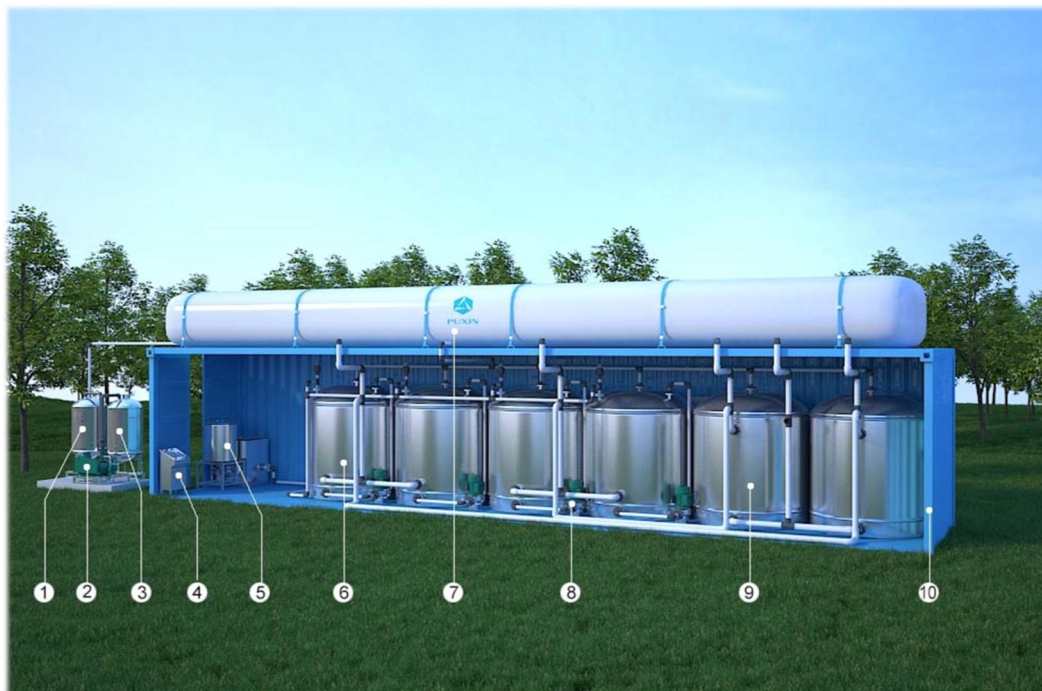


Figura 19. Sistema de biodigestão em contêiner Puxintech (Fonte: Puxintech).

Existem também biodigestores para operação em escalas maiores, comercializados juntamente com o sistema de cogeração. A *Seab Energy* possui dois sistemas de tratamento em contêineres como o mostrado anteriormente, o *Flexibuster* e o *Muckbuster*, que podem ser vistos na Figura 20, foram projetados para produzir biogás a partir de resíduos alimentares e resíduos de esgoto, respectivamente. O fabricante afirma que unidades individuais podem ser combinadas para serem capazes de tratar entre 500 e 3000 kg de resíduos alimentares por dia, e realizou estudos de caso para algumas aplicações, como na Universidade de Southampton, na Inglaterra e num supermercado em Portugal, no qual tratou em um ano 216 toneladas de lixo, produzindo 88000 kWh de energia elétrica, 158000 kWh de calor e 180 toneladas de fertilizante.



Figura 20. Flexibuster à esquerda e Muckbuster à direita (Fonte: SeAB Energy).

A também britânica *QUBErenewables* disponibiliza as unidades em contêineres *BioQUBE* e *PowerQUBE*, soluções para a biodigestão anaeróbica e para a geração de energia, respectivamente. De acordo com o fabricante as diferentes configurações do sistema permitem facilmente o tratamento de 180 a 880 toneladas de lixo alimentar por ano, e uma capacidade de geração de 3 a 50 kW. Com aplicação maior em área rural, o equipamento disponibiliza a possibilidade de operar isoladamente ou em conexão com a rede, exportando a energia produzida com segurança. As instalações do sistema BioQUBE juntamente com os equipamentos auxiliares pode ser vista na Figura 21.



Figura 21. Instalações do sistema em contêineres BioQUBE (Fonte: QUBErenewables).

No Brasil a empresa paranaense Ecoproducts possui uma solução para tratamento de resíduos sólidos e líquidos, o sistema Kwayb Waste Solution, mostrado na . Este equipamento, que ocupa o volume de um contêiner de 40 pés, realiza o fracionamento e secagem dos resíduos, transformando-os em produtos como fertilizantes, biomassa ou ração animal. Segundo o fabricante o tempo de residência é de apenas cinco segundos, com uma temperatura de operação de 250°C e geração de energia térmica de até 500000 kcal/h. O sistema é normalmente utilizado em operações agrícolas, florestais ou industriais de grande escala, com capacidade de até quatro toneladas por hora, reduzindo a umidade da biomassa até 10% e ainda conta com a opção de conversão de energia térmica através de vapor, gás, biomassa ou resistência elétrica.



Figura 22. Instalações do sistema Kwayb Waste Solution (Fonte: Ecoproducts).

Considerados os sistemas apresentados é possível verificar a utilização da biodigestão em várias escalas, desde a residencial unitária até a industrial. Apesar de ser muito utilizada em áreas rurais, as tecnologias mais compactas como as em contêiner podem ser facilmente transportadas e instaladas em ambiente urbano com restrições de espaço. O conhecimento da tecnologia disponível comercialmente torna possível estudar a sua aplicação em casos reais, nos quais se espera verificar que o aumento da eficiência energética através do processo pode, além de reduzir impactos ambientais também representar uma oportunidade econômica.

3. CONCEITOS TEÓRICOS

O presente capítulo apresenta os conceitos teóricos e tecnológicos sobre o processo de produção do biogás, redução de emissões e implementação de tecnologias de biodigestão para que se possa ter um maior entendimento sobre o objeto de estudo deste trabalho e o conhecimento a ser aplicado no estudo de caso a ser realizado posteriormente.

3.1. PROCESSO DE BIODIGESTÃO

As condições climáticas tropicais aliadas à representativa e diversa indústria agropecuária formam condições ideais que favorecem o desenvolvimento de projetos de aproveitamento energético da biomassa no Brasil. A maioria das atividades agropecuárias, industriais e urbanas gera grandes quantidades de resíduos e, enquanto os inorgânicos podem ser reciclados ou reutilizados, os orgânicos podem ser submetidos a processos biológicos para redução da sua carga poluidora. Tanto o tratamento aeróbico quanto o anaeróbico podem reduzir a carga orgânica e o potencial poluidor dos resíduos, porém no segundo o decréscimo da carga poluidora está associado à geração de biogás, que consiste numa mistura de gases (metano, dióxido de carbono, sulfeto de hidrogênio, entre outros) com potencial energético. As transformações químicas ocorrem em reatores, chamados de biodigestores, no qual ocorre simultaneamente a produção de biofertilizantes. (Senai, 2016).

A biodigestão consiste fundamentalmente em um processo bioquímico de vários estágios que ocorre na ausência de oxigênio, podendo produzir biogás composto por 60-70% de metano e substratos fertilizantes a partir do fornecimento de matéria orgânica (Barati et al, 2017). O biogás é um biocombustível cuja produção é constante caso haja produção contínua de resíduos, sendo assim considerado uma fonte renovável de energia (Santos et al, 2018). O processo acontece em ambiente aquoso, permitindo que matéria orgânica com alto teor de umidade seja processada sem necessidade de secagem, diferentemente de outras tecnologias de conversão, como a combustão, que demanda a existência de uma etapa de prévia para tratar resíduos úmidos. Na maioria dos casos o biogás é valorizado energeticamente através do processo de cogeração, no qual são geradas simultaneamente eletricidade e calor a eficiências típicas de 33% e 45% (Appels et al, 2011).

Embora amplamente utilizado, a bioquímica e a microbiologia do processo de digestão são temas de alta complexidade, e ainda cabe a realização de estudos sobre a operação e o funcionamento dos processos utilizados atualmente. A biodigestão pode ser subdividida em diversos caminhos metabólicos com a participação de grupos de microrganismos com diferentes comportamentos fisiológicos. (Chernicaró, 2007). O primeiro grupo secreta enzimas que realizam a hidrólise de materiais poliméricos e os transformam em monômeros, como glicose e aminoácidos. Esses são em seguida convertidos por um segundo grupo de bactérias, acetogênicas, em ácidos graxos voláteis, moléculas de hidrogênio e ácido acético. Finalmente, o terceiro grupo de bactérias, metanogênicas, converte H_2 , CO_2 e acetato em metano. Normalmente são produzidos 100-200 m^3 de biogás por tonelada de RSU digerida (Verma,

2002). A Figura 23 apresenta um esquema das etapas bioquímicas presentes no processo de biodigestão com indicação das reações específicas que ocorrem em cada fase.

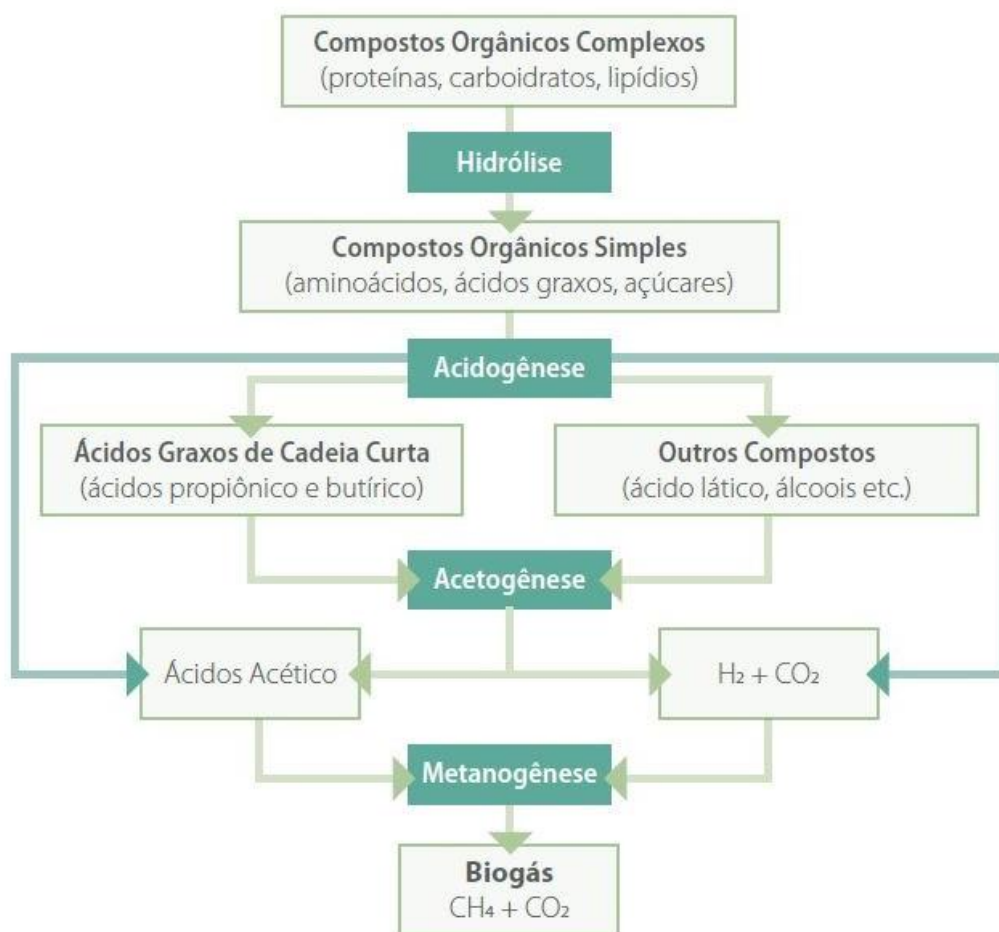


Figura 23. Etapas bioquímicas da biodigestão anaeróbica (Fonte: Senai).

De forma simplificada, o processo de produção de biogás e fertilizante através da biodigestão anaeróbica pode ser dividido em quatro estágios: pré-tratamento, digestão de resíduos, recuperação do gás e tratamento dos rejeitos. O pré-tratamento se faz necessário pois a maioria dos sistemas demanda uma separação manual ou mecânica para que se obtenha uma massa homogênea, que será posteriormente triturada. Em seguida os resíduos serão diluídos por diferentes opções de fontes de água, desde água limpa à resíduos de esgoto, e então serão armazenados por um determinado período de retenção para que seja realizada a sua digestão. No final o gás é recuperado, secado e dessulfurizado, enquanto os rejeitos do processo podem ser desidratados, curados aerobicamente e a água resultante do processo reutilizada na diluição de mais resíduos. É comum a necessidade de um aquecedor para manter uma temperatura ideal durante o processo, e muitas vezes para isso é usado o calor gerado pela queima do próprio biogás produzido (Verma, 2002). O esquema da Figura 24 ilustra os estágios do processo.

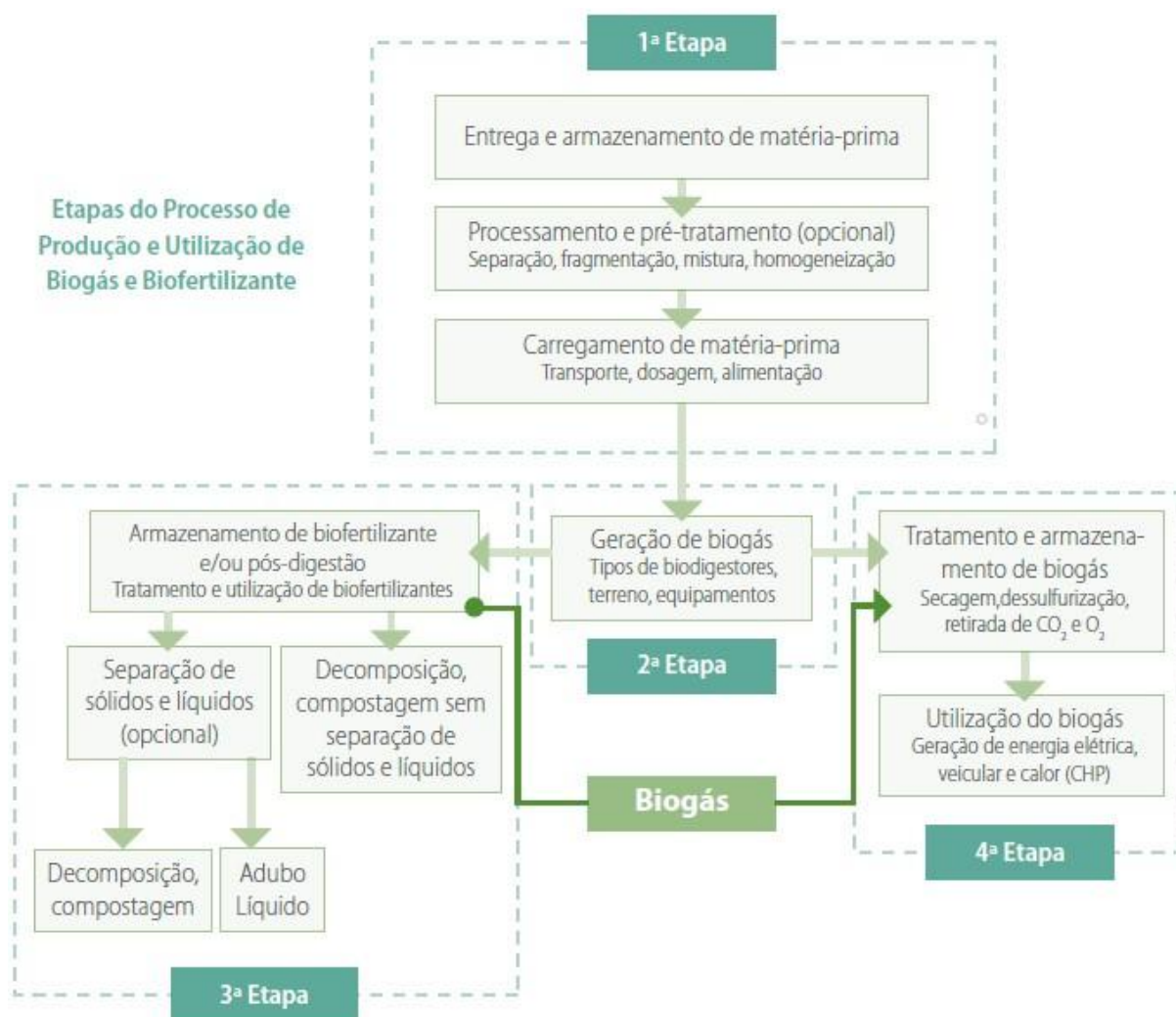


Figura 24. Esquema do processo de biodigestão anaeróbica (Fonte: Senai).

A relevância dos resíduos orgânicos alimentares como matéria-prima para geração de biogás é discutida e avaliada por Zhang et al (2006). Seu estudo realizado em laboratório analisa a biodegradabilidade de resíduos provenientes de diferentes estabelecimentos da cidade de San Francisco através da capacidade de produção de biogás e porcentagem de sólidos – totais (ST) ou voláteis (SV) – destruídos no processo. A produção é medida pela quantidade de biogás que pode ser produzida por unidade de sólidos voláteis contidos na mistura, após submetidos à biodigestão anaeróbica por tempo suficiente sob uma dada temperatura. Com base nos resultados apresentados e dispostos na Tabela 12 é possível considerar que para cada grama de sólidos voláteis presentes na mistura, será produzido 0.6 litro de biogás com um conteúdo médio de metano de aproximadamente 73%.

Tabela 12. Produção e composição do biogás em função dos resíduos orgânicos (Fonte: Zhang et al, 2006).

Parâmetro	Unidade	Valor médio
Conteúdo médio de metano	%	73.14
Conteúdo médio de dióxido de carbono	%	26.86
Destruição de SV	%	80.57
pH médio ao final do processo	-	7.57
Produção de metano	L/gSV	0.44
Produção de biogás	L/gSV	0.6

3.2. ASPECTOS AMBIENTAIS E ECONÔMICOS

A instalação de tecnologias de tratamento de resíduos orgânicos no local de geração produz uma série de benefícios ambientais, como a substituição do consumo de combustíveis fósseis pelo consumo do biogás, redução da pegada de carbono através da redução na quantidade de lixo levado para aterros – anualmente evita-se a emissão de cerca de 465 kg de CO₂ equivalente por tonelada de rejeito tratado por biodigestão anaeróbica – e a produção de compostos fertilizantes para utilização no próprio local ou para comercialização posterior (Wrap, 2013).

Além dos benefícios ambientais da implementação da tecnologia de biodigestão, vantagens econômicas também podem ser fatores decisivos quando considerado o tratamento de resíduos no local de geração. Redução nos custos com coleta, disposição, consumo de combustíveis e possibilidade de se aumentar a receita através da venda de combustíveis excedentes ou da eletricidade produzida são alguns dos fatores principais que podem viabilizar economicamente a implantação do sistema.

O principal custo na implementação de tecnologias de tratamento consiste na compra dos equipamentos e/ou construção do reator. O valor dependerá na escolha da tecnologia e na dimensão desejada. Unidades maiores com operação elétrica e painéis de controle serão mais caras do que unidades acionadas manualmente, porém propiciam um maior grau de controle, potencialmente reduzindo custos operacionais. Sistemas que requerem energia elétrica deverão ser devidamente cobertos e instalados em superfícies de concreto, o que pode levar a um aumento no custo a depender do local de instalação (Wrap, 2013).

Outro fator de relevância na análise econômica reside nas opções de financiamento e políticas de incentivo à produção de biogás. Na União Européia, os planos são de intensificação da produção através de diversas propostas, como a diminuição na emissão de gases de efeito estufa em 20% até 2020 e o

aumento na proporção de energia gerada a partir de fontes renováveis de 8,5% para 20% (Ec, 2007). No Reino Unido incentivos financeiros diretos como as *Feed-in Tariffs (FITs)*, que garantem receita para pequenos produtores de eletricidade por kWh produzido ou exportado para a rede no valor de 15.16 p/kWh e 4.64 p/kWh, ou o *Renewable Heat Incentive (RHI)*, que provém receita fixa para geradores de biogás e biometano no valor de 7.3 p/kWh (Wrap, 2013). Importante ressaltar que apesar das diretrizes impostas pela Comissão Européia, diversos países além do Reino Unido estabeleceram metas ainda mais ambiciosas para a inclusão de fontes de energias renováveis na matriz energética.

No Brasil foi instituído em 2002 o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), que estabelecia preços de compra para biogás de aterros, no entanto os valores se mostraram pouco atrativos e não houve sequer uma contratação para geração de energia a partir do biogás na época (Schütte, 2017). Deste então uma série de avanços ocorreram no setor, como a criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos em 2010, através da Lei 12.305/10. Ela apresenta instrumentos que permitem enfrentar problemas sociais, ambientais, e econômicos decorrentes do manejo inadequado de resíduos sólidos, propondo a diminuição do volume de lixo orgânico destinado a aterros sanitários (Brasil, 2010). Apesar dos esforços já realizados para que se explore o real potencial de utilização do biogás e biometano no setor energético brasileiro ainda é necessário que certas barreiras regulatórias e organizacionais sejam superadas. Apesar de existir um conjunto de regulações favoráveis a utilização de fontes renováveis, os incentivos ainda são subvalorizados e imaturos (Schütte, 2017).

O tempo de retorno do investimento realizado está fortemente atrelado ao tipo de tecnologia utilizada e circunstâncias específicas de cada organização. Informações de fornecedores e presentes em estudos de caso sugerem tempos de retorno típicos entre 3 e 9 anos, influenciados principalmente pelos seguintes fatores (Wrap, 2013):

- Economia de escala – Quanto maior a instalação, menor o custo de implementação por tonelada de resíduo tratado;
- Contratos de financiamento – Os custos anuais estarão relacionados ao acordo de financiamento assinado;
- Tipo de tecnologia – Sistemas operados manualmente são mais baratos do que os automatizados, mas se tornam inviáveis quando se lida com quantidades maiores do que 500 kg de lixo orgânico por semana, já que seria necessário diversas unidades e a operação se tornaria pouco prática;
- Mão de obra – Os custos com mão de obra podem ser adicionais aos custos já existentes relacionados ao tratamento de resíduos caso haja necessidade de contratação de funcionários para operar os equipamentos.

4. ESTUDO DE CASO

De forma a aplicar os conceitos científicos e tecnológicos reunidos até o momento foi realizado um estudo de caso, no qual estes foram analisados em conjunto com dados reais para se determinar as implicações produtivas, ambientais e econômicas da instalação de um sistema de tratamento de resíduos orgânicos alimentares por biodigestão anaeróbica no Restaurante Universitário (RU) da Universidade de Brasília, ilustrado na foto da Figura 25.



Figura 25. Restaurante Universitário da UnB (Fonte: UnB Agência).

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO

O RU situado no Campus Darcy Ribeiro é responsável por servir mais de 5 mil refeições por dia divididas entre 3 períodos, no ano de 2017 funcionou por 361 dias e, de acordo com a empresa responsável pela unidade, em um almoço típico são utilizadas mais de 6 toneladas de alimentos no preparo, cujos rejeitos podem ser utilizados como matéria prima para a produção do biogás e energia renovável. Para realização do estudo foram necessárias informações acerca das instalações do restaurante não disponibilizadas normalmente, portanto para obtê-las foi feita uma visita guiada pela gerência da unidade, que disponibilizou informações acerca da produção e do desperdício médio durante o mês de setembro. Foram produzidos durante este período, em média, 574 kg de lixo alimentar por dia, os quais são armazenados em tonéis dentro de uma câmara fria para evitar sua decomposição e o eventual mal cheiro, e diariamente são feitas entre três a cinco coletas para o descarte de todo o resíduo. O restaurante em si não possui um controle rigoroso quanto à quantidade de lixo diário, portanto o valor para a produção média foi feito através da medição em três dias diferentes, para as refeições do café da manhã, almoço e janta. É válido ressaltar que todas as quantidades variam consideravelmente a depender

do período, sendo maiores em período normal de aulas e menores durante férias e recessos. Para este estudo foi considerado apenas o valor da produção de resíduos medida. Além disso foram também fornecidos dados aproximados sobre o custo mensal com eletricidade, água e sobre o aquecimento dos fornos e caldeiras, realizado através da queima direta do diesel. As informações relevantes para a caracterização da unidade diante do presente estudo estão dispostas na Tabela 13. A partir destas informações obtidas na visita ao restaurante

Tabela 13. Informações acerca da unidade do Restaurante Universitário (Fonte: Sanoli, 2018, entrevista estruturada, Brasília, 19/11/2018).

Parâmetro	Unidade	Valor
Número de refeições servidas no mês	-	148781
Produção diária média de resíduos	kg	574.4
Consumo mensal de diesel	m ³	10
Custo mensal com eletricidade	R\$	12000
Custo mensal com água	R\$	92000

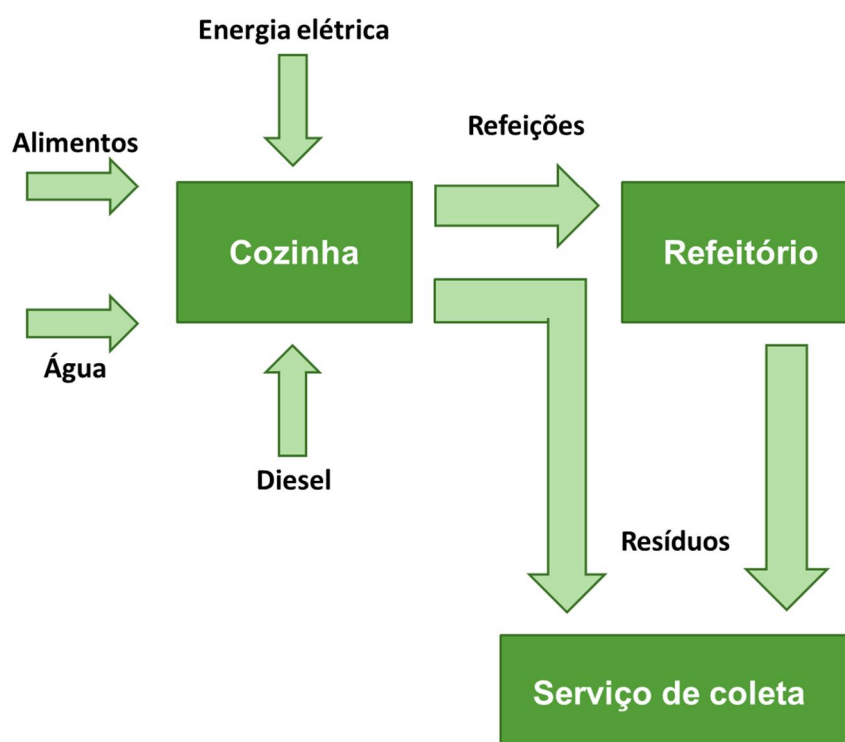


Figura 26. Esquema elaborado para o serviço do Restaurante Universitário.

As características físicas e químicas do lixo orgânico são informações importantes para o design e operação de biodigestores, pois afetam a produção do biogás e a estabilidade durante o processo. Elas incluem, mas não se limitam ao teor de umidade, de sólidos voláteis e de nutrientes, tamanho médio das partículas e biodegradabilidade (Zhang, 2006). Em seu estudo realizado com resíduos alimentares da Universidade de Seul, Kwon et al (2003) caracterizou o lixo produzido, composto principalmente por restos de alimentos e refeições quanto as características relevantes para o seu processo de degradação. Neste estudo foi considerado que os resíduos produzidos pelo RU possuem uma composição semelhante aos da universidade coreana, cujos detalhes são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14. Características físicas e químicas dos resíduos alimentares (Fonte: Kwon).

Característica	Unidade	Valor
pH	-	5.12
Teor de umidade	%	80
Teor de sólidos voláteis	%	94

4.2. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA APLICADO

No seu relatório de 2013, a organização britânica WRAP (The Waste and Resources Programme) fornece um guia para a instalação de soluções para tratamento de lixo orgânico no local de geração. O documento é destinado não somente a gerentes de organizações do setor público como escolas, hospitais e universidades, mas também a organizações como hotéis, restaurantes, bares e cafês (Wrap, 2013). Um dos resultados apresentados no relatório consiste numa árvore de decisão para orientação quanto ao modelo do sistema a ser instalado com base em parâmetros como a produção diária de resíduos, disponibilidade inicial de recursos financeiros e possibilidade de utilização do biogás e composto produzidos. De acordo com as informações obtidas na visita verificou-se que haveria a possibilidade de utilização dos compostos orgânicos nos jardins da universidade ou até mesmo a sua comercialização, como é feito em instalações existentes (BioCycle, 2013). Considerando uma produção de resíduos entre 1 e 5 toneladas por semana, baixos custos gerais de projeto e possibilidade da produção de biogás o sistema apontado como ideal é o *Flexibuster*, unidade em contêineres automatizada produzida pela britânica SeaB Energy, cujo funcionamento esquemático pode ser visto na Figura 27.

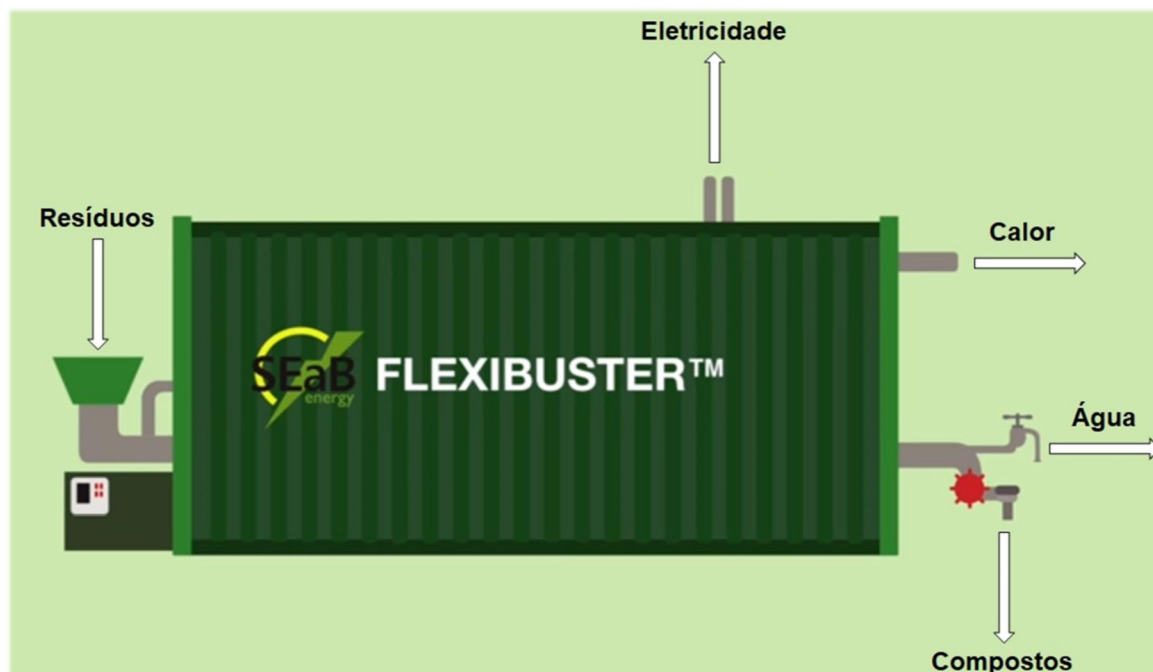


Figura 27. Funcionamento esquemático da unidade Flexibuster. Adaptado de:
<https://www.youtube.com/watch?v=WS1EMy2zwJI> (acessado em 19/11/2018).

Como visto previamente, esse sistema de tratamento em contêineres é capaz de atender a demanda observada podendo também gerar simultaneamente energia térmica e elétrica através da cogeração. O sistema não requer a adição de co-substratos e opera com fluxo contínuo, ideal para a adição diária de resíduos. A menor unidade tem capacidade para tratar até 500 kg de resíduos diariamente. (Wrap, 2013). Uma das unidades instaladas localiza-se na Universidade de Southampton e opera desde 2013 tratando resíduos alimentares, óleo de cozinha e restos de bebidas alcoólicas provenientes de diversos estabelecimentos. Para atender normas do Reino Unido como a PAS 110, que estabelece critérios mínimos de qualidade sobre a entrada e a saída dos compostos no processo de biodigestão anaeróbica (BSI, 2014), o sistema logo após a trituração inicial faz com que a mistura passe por tanques de pasteurização que utilizam calor residual do motor para aquecer a mistura a 70°C, logo antes de a encaminhar para os tanques de retenção, onde ficam por aproximadamente quinze dias. Composta por 3 contêineres de 6 m (20 pés) de comprimento, 2.44 m de largura e 2.8 m de altura, dos quais dois são responsáveis pelo processo de geração do biogás e o último cuida da compressão e armazenamento, as instalações recebem em média um total de 408 kg (900 lb) de resíduos orgânicos por dia e produz um total de 46 m³ por dia de biogás (BioCycle, 2013). Os dados relevantes para o estudo estão listados na Tabela 15.

Tabela 15. Dados do sistema na Universidade de Southampton (Fonte: BioCycle).

Parâmetro	Unidade	Valor
Resíduos tratados diariamente	kg	408
Biogás produzido diariamente	m ³	46
Tempo de residência	dias	15
Vida útil	anos	20
Dimensões	m	Três unidades de 6 x 2.4 x 2.8

Considerando a aplicação do sistema descrito acima ao RU é possível elaborar um esquema similar ao da Figura 26, substituindo o serviço de coleta pelo equipamento de biodigestão, que por sua vez irá produzir uma quantidade de biogás capaz de substituir parte do diesel consumido na cozinha, além de do biofertilizante que poderá ser utilizado na jardinagem ou comercializado. O esquema para o sistema proposto considerando a utilização da biodigestão no RU pode ser visto na Figura 28.

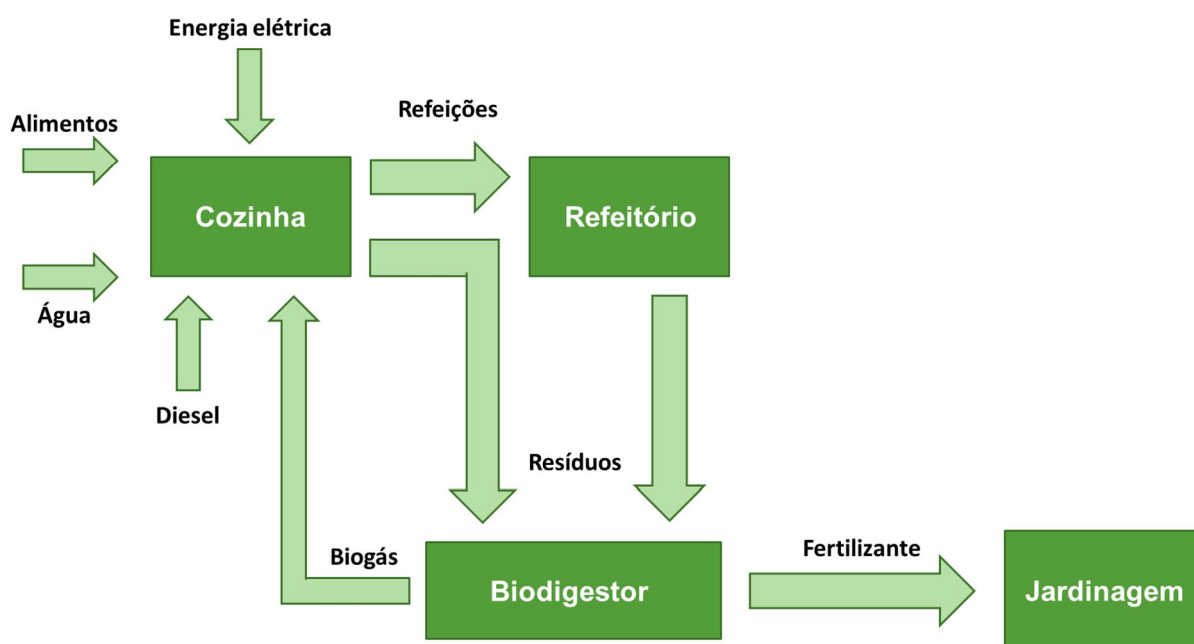


Figura 28. Esquema para representação do uso do processo de biodigestão no RU.

4.3. PRODUÇÃO DO BIOGÁS E CONVERSÃO DE ENERGIA

Com base nos dados apresentados na Tabela 12 a respeito da produção de biogás em função da quantidade de sólidos voláteis presentes na mistura, as características físicas e químicas dos resíduos

alimentares apresentadas na Tabela 14 e os dados apresentados na Tabela 15 sobre a produção nas instalações da Universidade de Southampton, é possível calcular diretamente valores para a produção de biogás conforme a Equação (1) e compará-los com os valores divulgado pelos fornecedores. Dessa forma será verificada a possibilidade de se aplicar o mesmo método para determinar a produção de biogás a partir de uma unidade análoga ao *Flexibuster* instalada no Restaurante Universitário. A produção de biogás P_b pode ser determinada pela Equação (1):

$$P_b = m_r \cdot \%S \cdot \%SV \cdot b \quad (1)$$

Considerando uma massa diária de resíduos orgânicos m_r no valor de 408 kg, na qual o percentual de sólidos totais $\%S$ corresponde a 20%, o percentual de sólidos voláteis $\%SV$ corresponde a 94% e utilizando um fator de conversão b no valor de 0.6 m³/kg, se verifica uma produção diária de biogás igual a 45.83 m³. Este resultado apresenta uma diferença menor do que 0.5% em relação ao valor encontrado na literatura, portanto a Equação (1) foi aplicada a uma produção de lixo de mesma composição e igual a 574.4 kg, conforme a Tabela 13. O biodigestor operando com essa quantidade de resíduos nas condições apresentadas resulta num volume de 64.5 m³ de biogás produzido diariamente. Considerando que 73% desse volume corresponde ao metano gerado verifica-se uma produção diária de 47.3 m³ de biometano.

Devido ao alto consumo de diesel pelo restaurante, com apenas algumas modificações na estrutura como a instalação de um sistema de distribuição e queimadores próprios para o gás há a possibilidade de se utilizar todo o biocombustível produzido como fonte alternativa de energia térmica, sem a necessidade de equipamentos para a conversão em energia elétrica e aumentando a eficiência energética do sistema. A quantidade de energia térmica convertida na queima de um combustível pode ser obtida através da multiplicação da sua massa pelo valor do seu poder calorífico, expresso em kWh/kg. Dessa forma se verificam valores para a produção de biogás e energia térmica de acordo com a Tabela 16.

Tabela 16. Produção diária de energia a partir do metano gerado.

Parâmetro	Unidade	Valor
Produção diária de biogás	m ³	64.5
Produção diária de biometano	m ³	47.3
Densidade do metano	kg/m ³	0.66
Poder calorífico superior	kWh/kg	15.4
Energia térmica produzida diariamente	kWh	477.7

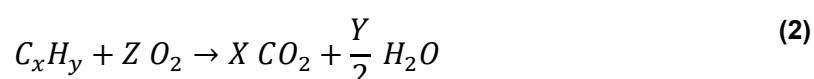
De forma a se determinar o potencial de substituição do diesel pelo biometano pode-se comparar os PCS e os dados sobre consumo e produção, respectivamente. Se for determinada uma taxa de substituição como a razão entre a energia térmica total produzida pelo biocombustível e a energia térmica total proveniente da queima do diesel é possível calcular uma economia mensal de combustível fóssil. Considerando o valor da Tabela 13 para o consumo de diesel, em um mês com 30 dias os valores para o volume de combustível poupado podem ser encontrados na Tabela 17. A economia de 1.46 m³ de diesel devido a substituição pelo biometano produzido no local aponta para um aumento da eficiência energética global das instalações do restaurante, assim como uma redução na emissão de gases estufa e nos custos mensais com combustível, aspectos a serem analisados nas etapas seguintes.

Tabela 17. Economia mensal de diesel devido à substituição pelo biometano.

Parâmetro	Unidade	Valor
Densidade do diesel	kg/m ³	832
Poder calorífico superior do diesel	kWh/kg	11.83
Consumo mensal de energia térmica através do diesel	MWh	98.4
Produção mensal de energia térmica através do metano	MWh	14.3
Taxa de substituição	-	0.15
Diesel poupado mensalmente	m ³	1.46

4.4. REDUÇÃO DE EMISSÕES

Em virtude do potencial energético observado na utilização do combustível renovável produzido, deseja-se determinar também o potencial ambiental desta substituição através da redução na emissão de gases estufa. A emissão de CO₂ na combustão pode ser analisada através do balanço estequiométrico para a reação de oxidação dos dois combustíveis em questão conforme a Equação (2).



A molécula do metano é composta por um átomo de carbono e quatro de hidrogênio, ou CH₄. O diesel, no entanto, é composto por diferentes hidrocarbonetos que variam entre C₁₀H₂₂ e C₁₅H₃₂, tendo

como fórmula média $C_{12}H_{24}$ (Date, 2011). Introduzindo as fórmulas químicas do metano e do diesel na Equação (2) e considerando a massa molar do carbono C igual a 12, do hidrogênio H igual a 1 e do oxigênio O igual a 16; verificam-se os valores dispostos na Tabela 18 para a emissão de dióxido de carbono por quilograma de combustível queimado.

Tabela 18. Composição molecular dos combustíveis consideradas no cálculo de emissões.

Combustível	Composição	Massa molecular	Emissão de CO_2 ($kgCO_2/kg$)
Metano	CH_4	16	0.36
Diesel	$C_{12}H_{24}$	168	3.14

Tendo em vista a substituição proposta de 1.46 m^3 de óleo diesel por metano produzido diariamente em biodigestores instalados no RU, e considerando os valores determinados previamente na Tabela 16 e Tabela 17 é possível determinar uma quantidade mensal de dióxido de carbono que deixa de ser lançado na atmosfera devido à substituição dos combustíveis. O valor consiste na diferença entre as emissões causadas pelo diesel e do biometano equivalente, resultando em aproximadamente três toneladas e meia de CO_2 por mês. Além da redução calculada, há também uma redução associada ao tratamento do lixo orgânico, que antes seria transportado até um aterro onde seria decomposto a céu aberto. Com a instalação do sistema de biodigestão esse lixo passa a se degradar produzindo biocombustível e, conforme visto no item 3.2 o tratamento em estudo leva à redução anual da emissão de 465 quilogramas de CO_2 por tonelada de resíduo orgânico redirecionado à biodigestão anaeróbica. Portanto novamente considerando os dados reunidos e um mês de trinta dias é possível determinar o potencial total de redução das emissões, apresentado na Tabela 19.

Tabela 19. Valores para a redução de emissões em toneladas de CO_2 por mês.

Parâmetro	Valor
Redução de emissões devido a substituição dos combustíveis	3.5
Redução de emissões devido ao tratamento por biodigestão	0.6
Total	4.1

4.5. ANÁLISE ECONÔMICA

Conforme exposto no item 3.2 o investimento em tecnologias de tratamento de resíduos para conversão de energia pode gerar vantagens econômicas além das ambientais. Após ter sido calculada uma quantidade de diesel poupada mensalmente, mostrada na Tabela 17, pode-se também determinar uma economia mensal devido aos gastos que seriam associados a este combustível, além de um retorno financeiro através da economia ou venda dos compostos fertilizantes produzidos no processo. Nesta etapa será determinado o custo específico (ou custo-benefício) para a conversão de energia e o tempo de recuperação do investimento T . Para determinação do custo-benefício será utilizada a metodologia proposta por Carvalho (2006), que leva em consideração o investimento inicial I , os custos com manutenção e operação CM , o valor do substrato produzido VS , a vida útil v e a taxa de juros i de forma a se obter um valor em dólares por kWh de energia térmica convertido no processo, unidade que permite uma fácil comparação entre diversos processos. O custo específico C/B , é dado pela Equação (3), na qual En representa a produção anual de energia.

$$C/B = \left[CM - VS + (I \cdot i) + \frac{I \cdot i}{(1 + i)^v - 1} \right] \cdot \frac{1}{En} \quad (3)$$

4.5.1. INVESTIMENTO INICIAL (I) E CUSTOS OPERACIONAIS (CM)

Para o sistema da Universidade de Southampton apresentado no item 4.2, o custo total de instalação da unidade com capacidade de 500 kg de resíduos diários foi de 168000 dólares (Biocycle, 2013). Foi considerado que a operação com os 574 kg de resíduos gerados por dia no Restaurante Universitário não representaria um acréscimo significativo nestes custos, visto que seriam necessárias poucas adaptações nos equipamentos para lidar com o volume extra de matéria orgânica. O segundo custo a ser considerado consiste nas despesas anuais com manutenção e operação do sistema. Os serviços de manutenção são prestados pela própria fornecedora, e somam um total aproximado de 8000 dólares por ano para o sistema inglês (Biocycle, 2013). Os custos operacionais com água e eletricidade compõem a menor parcela dos gastos com a unidade e, na universidade inglesa, somam anualmente 2400 dólares (Biocycle, 2013). A água é adicionada à mistura de resíduos para que seja realizado o processo da biodigestão, como visto na seção 3.1, enquanto que a eletricidade é consumida na operação dos equipamentos do sistema, como o triturador e a bomba responsável por comprimir o gás no contêiner de armazenamento, de acordo com a seção 4.2. Como esses custos são diretamente proporcionais ao volume de resíduos no processo, foi definido um fator de escala f com base na razão entre as massas diárias de rejeitos no RU em Brasília e na Universidade de Southampton, conforme a Equação (4).

$$f = \frac{m_1}{m_2} \quad (4)$$

Sendo m_1 correspondente a 574.4 kg e m_2 igual a 408 kg o valor de f aproximadamente 1.4. Foi convencionado que a multiplicação do fator de escala por custos relacionados diretamente ao volume de lixo produzido resultam no suposto custo equivalente de um sistema operando com as condições desse estudo de caso. Dessa forma foi considerado que os custos operacionais com água e eletricidade no Restaurante Universitário somariam 3377 dólares. Portanto foi considerado que o custo CM pode ser dado pela soma dos custos com manutenção, eletricidade e água, somando 11377 dólares por ano. Um resumo dos custos totais associados à instalação e operação do sistema está disposto na Tabela 20.

Tabela 20. Custos associados à instalação e operação do sistema de biodigestão no RU.

Parâmetro	Unidade	Valor
Investimento inicial (I)	US\$	168000
Custos operacionais (CM)	US\$/ano	11377
Fator de escala	-	1.4

4.5.2. ESTIMATIVA DOS RETORNOS

O primeiro retorno financeiro imediatamente considerado neste estudo de caso está associado à produção do biofertilizante, indicado como VS . Na unidade que opera na Universidade de Southampton o retorno proveniente dos fertilizantes produzidos é avaliado em 2239 dólares ao ano (Biocycle, 2013). Como o volume de lixo tratado afeta diretamente a produção dos compostos orgânicos, é possível novamente multiplicar o fator de escala f pelo retorno associado, resultando num valor de 3150 dólares ao ano.

Apesar do sistema promover a conversão de energia, no modelo proposto não há a intenção de comercialização do biogás ou da energia produzida, e sim o seu uso no lugar de uma fonte proveniente de combustíveis fósseis. Como visto anteriormente, foi determinada a possibilidade de uma economia mensal de aproximadamente 1460 litros de diesel. Um preço de 3.5 reais por litro (ou aproximadamente 0,95 dólares, a uma taxa de conversão de 3,7) resulta numa economia anual EC de até 16476 dólares apenas com a substituição de parte do combustível.

O último retorno avaliado está associado aos custos com o descarte do lixo, que deixa de existir no caso do tratamento realizado no local de geração. No Distrito Federal a Lei nº5610, de 16 de fevereiro de 2016, classifica como grandes geradores de resíduos pessoas físicas e jurídicas que produzam resíduos em estabelecimentos de uso não residencial, incluídos os estabelecimentos comerciais, os públicos e os de prestação de serviço, cuja composição seja similar àquelas dos resíduos domiciliares e cujo volume diário seja superior a 120 litros (Distrito Federal, 2016). A Resolução nº 14 da Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (Adasa), de 15 de setembro de 2016, estabelece os preços públicos a serem cobrados pelo prestador de serviços de limpeza urbana na

execução de atividades de gerenciamento de resíduos de grandes geradores (Adasa, 2016). O valor estabelecido para coleta de resíduos sólidos orgânicos é 150 reais por tonelada, e o valor para a disposição final da mesma quantidade em aterro sanitário é de aproximadamente 92 reais. Considerando a produção anual de aproximadamente 200 toneladas de resíduos pelo RU é possível estimar uma economia **TL** de aproximadamente 13525 dólares relacionada à eliminação da necessidade do serviço de coleta e transporte. Um resumo dos retornos financeiros associados à utilização do sistema está disposto na Tabela 21.

Tabela 21. Retornos associados à utilização do sistema de biodigestão no RU.

Parâmetro	Unidade	Valor
Retorno devido ao valor do substrato (<i>VS</i>)	US\$/ano	3150
Retorno devido à economia do combustível (<i>EC</i>)	US\$/ano	16476
Retorno devido ao tratamento local dos resíduos (<i>TL</i>)	US\$/ano	13525

4.5.3. CUSTO ESPECÍFICO (*C/B*) E TEMPO DE RECUPERAÇÃO *T*

Após determinados os custos iniciais, operacionais e o potencial retorno financeiro do sistema de tratamento de resíduos por biodigestão anaeróbica torna-se possível estimar o custo específico de acordo com a Equação (3) apresentada no início deste item, obtendo um valor de US\$ 0,14 por kWh produzido. Vale ressaltar que para este cálculo não foi considerado o retorno **TL** devido ao tratamento local dos resíduos, de forma a aproximar o valor aos normalmente determinados em cálculo financeiro para instalações de geração de energia. Com base nos valores calculados é possível determinar um tempo de retorno **T** com base nos custos, retornos e no custo do capital investido ao longo do tempo. O valor de **T** é determinado pela Equação (5), considerando uma taxa *i* igual à Selic em 7 de dezembro de 2018 no valor de 6,4% a.a (Banco Central, 2018).

$$T = \frac{I}{EC + TL + VS - CM - I \cdot \left[\left(\frac{(1+i)^v \cdot i}{(1+i)^v - 1} \right) \right]} \quad (5)$$

O valor obtido para o tempo de retorno do investimento em estudo é de aproximadamente **25 anos**, um valor bastante defasado se comparado ao prazo de retorno estimado de quatro anos para a unidade da Universidade de Southampton – ambos podem ser observados na Tabela 22. Este valor aponta o investimento na solução como inviável, visto que a vida útil do equipamento é de 20 anos, conforme a

Tabela 15. Os principais fatores que contribuem para esta diferença residem nos altos custos associados ao descarte de resíduos na Inglaterra – cerca de 75% mais altos – e nos incentivos fornecidos pelo Reino Unido para produtores de energia a partir de fontes renováveis, que no caso de Southampton somam aproximadamente 16000 dólares ao ano, quase dobrando o lucro líquido e reduzindo de forma significativa o tempo de retorno para o investimento (Biocycle, 2013).

Tabela 22. Tempo de retorno para os sistemas das Universidades de Southampton e de Brasília.

Tempo de retorno T para o sistema da Universidade de Southampton	4 anos
Tempo de retorno T para o sistema instalado no Restaurante Universitário da UnB	25 anos

5. CONCLUSÃO

Diante da proposta inicial de se realizar um estudo sobre os aspectos ambientais, energéticos e econômicos da biodigestão anaeróbica é possível afirmar que o trabalho permitiu a criação não somente de uma base teórica para estudos futuros, mas uma fonte de informações reunidas de forma a fundamentar e guiar o estudo de caso, no qual foi avaliada a viabilidade da instalação de um sistema de biodigestão para tratar os resíduos do Restaurante Universitário da Universidade de Brasília.

- Foram obtidos na pesquisa inicial 131 artigos entre os anos de 1977 e 2018, que foram classificados quanto à qualidade e relevância para o trabalho, por meio da divisão entre foco direto, geral e indireto;
- Verificou-se um crescimento recente nas pesquisas sobre o tema, visto que 85% das publicações foram posteriores ao ano de 2010 e, na análise descritiva também se observou o quanto é difuso o domínio do conhecimento, apenas um autor foi responsável por mais de 2 publicações e as dez principais instituições foram responsáveis por apenas 23% destas;
- O SciMAT permitiu a avaliação da relação entre os diferentes temas e como se desenvolveram ao longo dos períodos estabelecidos. Foram determinados os principais clusters de palavras-chave, que foram analisados e, por fim foram obtidos e analisados os dez principais artigos;
- A análise descritiva realizada na base de dados de patentes Patentscope retornou 3698 resultados e indicou uma tendência similar à observada nas publicações científicas quanto ao crescimento recente do tema, porém demonstrou uma concentração maior entre menos países e, no lugar das universidades as principais instituições passaram a ser as empresas de energia;
- Foram reunidas informações sobre diversos sistemas comerciais de biodigestão para produção de biogás no intuito de caracterizar a tecnologia disponível atualmente;
- Foi realizada uma entrevista com a administração do Restaurante Universitário para obter dados não regularmente disponíveis. Verificou-se que o estabelecimento produz diariamente 574 kg de lixo orgânico e consome mensalmente cerca de dez mil litros de diesel. Os resíduos foram caracterizados em comparação com resíduos de origens similares;
- Com base no relatório publicado pela WRAP sobre a seleção de sistemas para tratamento de resíduos no local de geração foi selecionado um sistema comercial a partir dos dados de entrada obtidos na entrevista. Foi determinado então que para o estudo de caso seria considerado um sistema similar ou equivalente ao Flexibuster, da britânica SeaB Energy;
- Informações sobre a produção de biogás, impactos ambientais, custos e retornos financeiros foram obtidas através da literatura científica e matérias publicadas pelo fabricante. Foi calculado que para uma unidade operando no RU seriam produzidos diariamente 64.5 m³ de biogás, dos quais 73% consistem em biometano que pode substituir até 1.46 m³ de diesel mensalmente. Essa operação resultaria numa redução de emissões em 4.1 toneladas de CO₂ por mês;

- Foram determinados valores para os custos de implementação, manutenção e operação com base em comparações entre as instalações da Universidade de Southampton e a da Universidade de Brasília. Foram também calculados retornos devido à substituição parcial do diesel pelo biometano, a possível comercialização do fertilizante produzido e a redução de custos com disposição de lixo;
- Ao se considerar o investimento no sistema caracterizado foi calculado um prazo de retorno de aproximadamente 25 anos, enquanto que o sistema similar na Inglaterra apresentou prazo de quatro anos. A distância observada está diretamente relacionada à diferença no preço da coleta do lixo entre os países e a defasagem dos incentivos para a produção de energia renovável a partir do biogás no Brasil.

Considerando os resultados obtidos a respeito do estudo de caso, é possível sugerir **futuros trabalhos** baseados nas demandas ainda não atendidas ou no aperfeiçoamento das análises realizadas.

- A análise financeira utilizou custos de sistemas instalados na Inglaterra (visto que o fabricante não exporta o produto para o Brasil) com o intuito de se avaliar a instalação de um sistema comercial similar no Restaurante Universitário. Dados de sistemas comerciais brasileiros ainda são escassos, porém com o crescimento da geração de energia por biogás no país é provável que mais informações passem a ser disponibilizadas, permitindo a realização de uma outra análise mais precisa e confiável;
- Adaptações para o equipamento podem ser estudadas de forma a permitir a acomodação de uma quantidade maior de resíduos. Além disso o motor para co-geração que o sistema dispõe não se faz necessário, visto que a aplicação é puramente a geração do biogás. Portanto há a possibilidade de se projetar um sistema similar para contemplar as demandas específicas deste caso. Seria necessário também estudar a implementação e construção do sistema no local, analisando a logística da operação;
- A distribuição do biogás para a cozinha do Restaurante demanda a existência de um sistema de tubulações para o metano, que deve ser estudado e projetado antes da instalação de qualquer equipamento, visto que a operação depende deste sistema;
- No caso da instalação do sistema nos arredores do RU há ainda a possibilidade de se considerar a coleta e tratamento do lixo orgânico de ao menos dez lanchonetes e restaurantes presentes na Universidade a uma distância menor que 1 km do suposto biodigestor. Seria necessária a realização de um estudo para determinar as quantidades de lixo orgânico produzidas e a viabilidade do transporte até o sistema de tratamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADASA. Resolução Nº 14, de 15 de Setembro de 2016. Brasília, 2016.

AICHINGER, P. et al. Synergistic co-digestion of solid-organic-waste and municipal-sewage-sludge: 1 plus 1 equals more than 2 in terms of biogas production and solids reduction. **Water Research**, v. 87, p. 416–423, 2015.

APPELS, L. et al. Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 4295–4301, 2011.

BANCO CENTRAL - Dados diários - <https://www.bcb.gov.br/htms/selic/selicdiarios.asp> - acesso em 09/12/2018.

BARATI, M. R. et al. Comprehensive exergy analysis of a gas engine-equipped anaerobic digestion plant producing electricity and biofertilizer from organic fraction of municipal solid waste. **Energy Conversion and Management**, v. 151, p. 753–763, 2017.

BIOCYCLE. Small-scale micropower. **Biocycle Energy**, n. December, p. 30–33, 2013.

BONK, F.; BASTIDAS-OYANEDEL, J.-R.; SCHMIDT, J. E. Converting the organic fraction of solid waste from the city of Abu Dhabi to valuable products via dark fermentation - Economic and energy assessment. **Waste Management**, v. 40, p. 82–91, 2015.

BRASIL. Lei Nº 12.305/10, de 02 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos, Brasília, DF, 2010.

BREUNIG, H. M. et al. Bioenergy Potential from Food Waste in California. **Environmental Science and Technology**, v. 51, n. 3, p. 1120–1128, 2017.

BRITISH STANDARDS INSTITUTE. PAS 110 : Specification for whole digestate , separated liquor and separated fibre derived from the anaerobic digestion of source-segregated biodegradable materials, 2014.

CAVALCANTI, P. S. Sistemas de Medição de Desempenho : Revisão Sistemática da Literatura e Análise Bibliométrica Priscila de Souza Cavalcanti Sistemas de medição de desempenho : Revisão sistemática da literatura e análise bibliométrica. **UFRJ**, p. 1–91, 2016.

CHERNICHARO, C. Biological Wastewater Treatment Vol.4: Anaerobic Reactors. [s.l.] **IWA Publishing**, 2007. v. 04

COBO, M. J.; HERRERA, F. SciMAT : A New Science Mapping Analysis Software Tool. **University of Granada**, v. 3, n. 8, p. 1609–1630, 2012.

COMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. Renewable energies in the 21st century: building a more sustainable future, 2007.

CRONIN, P.; RYAN, F.; COUGHLAN, M. Undertaking a literature review : a step-by-step approach . **British Journal of Nursing**, p. 38–43, 2008.

DATE, A.W., Analytic Combustion: With Thermodynamics, Chemical Kinetics and Mass Transfer (Google eBook). **Cambridge University Press**. ISBN 1-107-00286-9, 2014.

DISTRITO FEDERAL. Decreto N 37.568, de 24 de agosto de 2016, Responsabilidade dos grandes geradores de resíduos sólidos, Brasília, DF, 2016.

EBNER, J. H. et al. Lifecycle Greenhouse Gas Analysis of an Anaerobic Codigestion Facility Processing Dairy Manure and Industrial Food Waste. **Environmental Science and Technology**, v. 49, n. 18, p. 11199–11208, 2015.

ECO PRODUCTS – <http://kwayb.com.br/fotos/> - acesso em 19/11/2018.

HENRIQUES, R. M. Aproveitamento Energético dos RSU: uma abordagem tecnológica. **UFRJ**, p. 204, 2004.

HOME BIOGAS – <https://homebiogas.com/shop/buy-the-homebiogas-system/> – acesso em: 10/06/2018.

KWON, S.; LEE, D. Evaluation of Korean food waste composting with fed-batch operations I: using water extractable total organic carbon contents (TOC_w). **Process Biochemistry**, v. 39, n. 10, p. 1183–1194, 2004.

LI, W. et al. Two-phase anaerobic digestion of municipal solid wastes enhanced by hydrothermal pretreatment: Viability, performance and microbial community evaluation. **Applied Energy**, v. 189, p. 613–622, 2017.

NIZAMI, A. S. et al. Developing waste biorefinery in Makkah: A way forward to convert urban waste into renewable energy. **Applied Energy**, v. 186, p. 189–196, 2017.

PHAM, T. P. T. et al. Food waste-to-energy conversion technologies: Current status and future directions. **Waste Management**, v. 38, n. 1, p. 399–408, 2015.

PUXINTECH – <http://en.puxintech.com/containeranaerobicsystemhome> - acesso em: 08/06/2018.

QUBERENEWABLES – <https://www.quber Renewables.co.uk/bioqube> - acesso em 19/11/2018.

RÓZSENBERSZKI, T. et al. Municipal waste liquor treatment via bioelectrochemical and fermentation (H₂O + CH₄) processes: Assessment of various technological sequences. **Chemosphere**, v. 171, p. 692–701, 2017.

SANTOS, I. F. S. DOS; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L. Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment plants in Brazil: An assessment of feasibility and potential. **Journal of Cleaner Production**, v. 126, p. 504–514, 2016.

SCHÜTTE, A. O Segmento do Biogás em Foco : Discussão das Políticas Públicas do Brasil e do

Mundo. **Universidade de Brasília**, 2017.

SEAB ENERGY – Flexibuster: How does it work? -

<https://www.youtube.com/watch?v=WS1EMy2zwJI> – acesso em 19/11/2018.

SEAB ENERGY – <https://seabenergy.com/products/anaerobic-digesters/> - acesso em 10/06/2018.

SEBRAE - Prazo de retorno do investimento -

<http://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/prazo-de-retorno-do-investimento-pri,90da5415e6433410VgnVCM1000003b74010aRCRD> - acesso em 19/11/2018.

SENAI. Oportunidades da cadeia produtiva de biogás para o estado do Paraná, 2016.

UNB AGÊNCIA – <https://ru.unb.br/index.php/diretoria> - acesso em 06/06/2018.

VERMA, S. Anaerobic Digestion of Biodegradable Organics in Municipal Solid Wastes. **Foundation School of Engineering & Applied Science Columbia University**, n. May, p. 1–56, 2002.

WEBSTER, J.; WATSON, R. ANALYZING THE PAST TO PREPARE FOR THE FUTURE: WRITING A LITERATURE REVIEW Analyzing the past to prepare for the. **Management Information Systems Quarterly**, v. 26, n. 2, p. 3, 2002.

WRAP. Guidance for on-site treatment of organic waste from the public and hospitality sectors, 2013.

YARI, M. et al. A comparative study of two SOFC based cogeneration systems fed by municipal solid waste by means of either the gasifier or digester. **Energy**, v. 114, p. 586–602, 2016.